



**Paulo Tiago Semanas Roberto**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Simulação numérica da propagação e rebentação de ondas utilizando o código OpenFoam**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: José Manuel Paixão Conde, Prof. Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias

Júri:

Presidente: Prof.Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Arguente: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Vogal: Prof.Doutor José Manuel Paixão Conde



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2014**



**Paulo Tiago Semanas Roberto**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Simulação numérica da propagação e rebentação de ondas utilizando o código OpenFoam**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: José Manuel Paixão Conde, Prof. Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologias

Júri:

Presidente: Prof.Doutor Luís Miguel Chagas da Costa Gil

Arguente: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Vogal: Prof.Doutor José Manuel Paixão Conde



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2014**

## **Simulação Numérica da propagação e rebentação de ondas utilizando o código OpenFoam**

**Copyright** © Paulo Tiago Semanas Roberto, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





*Dedico esta dissertação aos meus pais, irmãos e amigos, com especial atenção aos meus colegas de faculdade por toda a ajuda que me deram ao longo do meu percurso acadêmico.*



## **Agradecimentos**

Agradeço a todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologia pelos ensinamentos transmitidos ao longo destes 5 anos de mestrado integrado.

Quero agradecer em particular ao professor e meu orientador José Conde, pelo apoio prestado ao longo da realização desta dissertação.

Um agradecimento especial ao meu pai e à minha mãe, pela educação que me deram, pelos valores transmitidos e por me terem dado a possibilidade de estudar.

Quero também agradecer aos meus irmãos, Nuno e David, por todo o apoio que sempre me deram.

Por fim, um agradecimento especial ao Diogo Afonso e a todos os meus amigos e colegas de curso que me acompanharam ao longo deste percurso académico.



# Resumo

Esta dissertação teve o intuito de validar o código numérico do *OpenFoam* para problemas na área da hidrodinâmica e propagação de ondas.

Para a geração de ondas através do código numérico recorreu-se ao *solver Waves2Foam*, uma ferramenta do *OpenFoam* baseada no *InterFoam*, solver baseado no método *VoF* (*Volume of fluid*) com a implementação de zonas de relaxamento para a geração e dissipação da energia das ondas.

Os casos simulados nesta dissertação tiveram o objectivo de testar a ferramenta para diferentes condições de propagação de ondas e diferentes teorias. Assim é apresentado um caso bidimensional com fundo horizontal e profundidade considerada infinita e outro bidimensional com fundo variável de forma a verificar a ocorrência ou não de rebentação, ambos para ondas regulares de primeira ordem ou ondas de Airy.

Além dos casos bidimensionais também são apresentados dois casos tridimensionais com fundo variável, para ondas regulares e bicromáticas e em situação com e sem rebentação.

Tanto o caso bidimensional de profundidade variável como o primeiro caso tridimensional foram baseados em ensaios e dados experimentais realizados num canal de profundidade variável para ondas regulares em situação com e sem rebentação.

O segundo caso tridimensional também foi baseado em ensaios experimentais no mesmo canal de fundo variável para ondas geradas bicromáticas em situação com e sem rebentação.

Através das simulações realizadas pode-se concluir que para casos de propagação de ondas sem rebentação o solver *Waves2Foam* obtém bons resultados. Já nos casos com rebentação os resultados apresentam alguma discrepância devida à não utilização de modelos de turbulência. No geral, o código numérico do *OpenFoam* dá bons resultados para resolver problemas de hidrodinâmica através de ondas regulares e de ondas bicromáticas.

**Palavras-chave:** *OpenFoam, Waves2Foam, propagação de ondas, ondas regulares de primeira ordem, ondas bicromáticas, rebentação de ondas.*



# Abstract

This dissertation was intended to validate the numerical software OpenFoam for Hydrodynamics and waves propagation problems.

For the numerical waves generation was used the solver Waves2Foam, a toolbox of the OpenFoam software based on another solver, InterFoam which is based in the method VoF (volume of fluid), with the implementation of the relaxation zones, for the generation and dissipation of waves energy.

All the simulated cases in this paper had the objective of testing this tool for different conditions of waves propagation and for different theories. Therefore, in this paper is presented a bidimensional case with a horizontal bottom and infinite depth. Also is presented another bidimensional case with variable depth to verify the wave transformation and the wave breaking. Both cases were simulated for the Stokes first wave theory, or Airy waves.

In addition to the bidimensional cases, were also simulated tridimensional cases with variable depth for regular and bichromatic waves, with or without wave breaking situation.

All the cases for variable depth, bidimensional and tridimensional, were based on experimental data from a wide range of wave flume tests for different waves theories, which the main objective was to study wave shoaling and breaking over a set of different gentle slopes for several incident waves.

Through the performed simulations it can be concluded that for cases without wave breaking, the solver Waves2Foam obtains good results. In cases with wave breaking the results show some discrepancies due to non-use of turbulence models. Overall the numerical code OpenFoam gives good results to solve hydrodynamics problems through regular waves and bichromatic waves.

**Keywords:** *OpenFoam, Waves2Foam, wave propagation, regular waves, bichromatic waves, wave breaking.*





# Índice

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Palavras-chave .....	vii
Abstract.....	ix
Índice .....	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas .....	xxi
Nomenclatura.....	xxiii
Símbolos Gregos.....	xxiv
Lista de Abreviaturas .....	xxiv
1º Capítulo .....	1
Introdução .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objectivos.....	2
1.3 Estrutura e organização da dissertação.....	3
2º Capítulo .....	5
Teoria de ondas.....	5
2.1 Conceitos básicos de geração de ondas.....	5
2.2 Teoria linear de ondas (teoria de Airy) .....	8
2.3 Ondas bicromáticas .....	11
2.4 Rebentação de ondas .....	14
3º Capítulo .....	15
Modelos numéricos.....	15
3.1 Mecânica dos Fluidos Computacional .....	15
3.2 Equações RANS .....	17
3.3 Método VoF .....	17

3.4 Código numérico do <i>OpenFoam</i> .....	18
3.5 <i>Solver Waves2Foam</i> .....	19
3.6 Algoritmo PIMPLE .....	20
4º Capítulo .....	21
Propagação de ondas num canal bidimensional de fundo horizontal .....	21
4.1 Simulação de ondas num canal bidimensional com fundo horizontal .....	21
4.1.1 Descrição da malha e esquemas numéricos .....	21
4.1.2 Condições de fronteira e iniciais do canal bidimensional.....	22
4.1.3 Análise e comparação de resultados .....	23
5º Capítulo .....	29
Propagação de ondas num canal bidimensional de fundo variável .....	29
5.1 Descrição dos ensaios experimentais .....	29
5.2 Caso bidimensional com fundo variável sem rebentação .....	31
5.2.1 Descrição da malha e esquemas numéricos .....	31
5.2.2 Condições de fronteira e iniciais do canal .....	33
5.2.3 Análise e comparação de resultados .....	34
5.2.3.1 Elevação da superfície livre.....	34
5.2.3.2 Análise de velocidades .....	38
5.3 Caso bidimensional de fundo variável com rebentação .....	40
5.3.1 Descrição da malha e esquemas numéricos .....	40
5.3.2 Condições de fronteira e iniciais do canal .....	41
5.3.3 Análise e comparação de resultados .....	42
5.3.3.1 Elevação da superfície livre .....	43
6º Capítulo .....	47
Propagação de ondas num canal tridimensional de fundo variável .....	47
6.1 Descrição dos ensaios experimentais .....	47

6.2 Caso de propagação de ondas regulares sem rebentação num canal 3D de profundidade variável .....	48
6.2.1 Descrição da malha e esquemas numéricos .....	48
6.2.2 Condições de fronteira e iniciais do canal .....	50
6.2.3 Análise e comparação de resultados .....	51
6.2.3.1 Elevação da superfície livre.....	51
6.2.3.2 Análise de velocidades .....	55
6.3 Caso de propagação de ondas regulares com rebentação num canal 3D de profundidade variável .....	57
6.3.1 Descrição da malha e esquemas numéricos .....	57
6.3.2 Condições de fronteira e iniciais do canal .....	59
6.3.3 Análise e comparação de resultados .....	60
6.3.3.1 Elevação da superfície livre.....	60
6.4 Caso de propagação de ondas bicromáticas com rebentação num canal 3D de profundidade variável.....	65
6.4.1 Descrição da malha e esquemas numéricos .....	65
6.4.2 Condições de fronteira e iniciais do canal .....	67
6.4.3 Análise e comparação de resultados .....	68
6.4.3.1 Elevação da superfície livre.....	68
6.4.3.2 Análise de velocidades .....	72
6.5 Caso de propagação de ondas bicromáticas sem rebentação num canal 3D de profundidade variável.....	75
6.5.1 Descrição da malha e esquemas numéricos .....	75
6.5.2 Condições de fronteira e iniciais do canal .....	77
6.5.3 Análise e comparação de resultados .....	78
6.5.3.1 Elevação da superfície livre .....	79
7º Capítulo .....	83
Conclusões .....	83

Referências Bibliográficas.....	85
---------------------------------	----

# Índice de Figuras

Figura 2.1 - Interacção mar-atmosfera, [6].....	6
Figura 2.2 - Representação de uma onda e seus parâmetros, [7].....	7
Figura 2.3 - Efeitos da profundidade na trajectória das partículas da água, no lado direito para águas profundas e no lado esquerdo para águas pouco profundas, [6]. ....	11
Figura 2.4 - Perfil de uma onda bicromática (a preto) resultante de duas ondas monocromáticas (verde e vermelho) e correspondente envelope (linha a azul tracejada), [5]. ....	12
Figura 3.1 - Estrutura do OpenFoam [11]. ....	19
Figura 4.1 - Malha utilizada para a simulação no caso bidimensional. ....	22
Figura 4.2 - Pormenor da malha do canal bidimensional com fundo horizontal na zona de propagação da onda. ....	22
Figura 4.3 - Caracterização do domínio numérico, adaptado [2]. ....	23
Figura 4.4 - Elevação da superfície ao longo do tempo, para as 4 sondas distribuídas ao longo do domínio. ....	24
Figura 4.5 - Elevação da superfície ao longo do tempo, através de 4 sondas igualmente distribuídas ao longo do canal [2]. ....	24
Figura 4.6 - Elevação da superfície ao longo do domínio para o instante $t=17s$ . ....	25
Figura 4.7 - Elevação da superfície livre no instante $t/T=24$ para as diferentes malhas testadas por [2]. ....	25
Figura 4.8 - Distribuição da magnitude da velocidade para o instante de tempo $t=17s$ , sendo a primeira imagem na zona de propagação da onda e a segunda, no lado direito, na zona de relaxamento. Resultados obtidos por [2]. ....	26
Figura 4.9 - Distribuição da magnitude da velocidade para o instante $t=17s$ obtida nesta simulação, a imagem à esquerda é referente à zona de propagação e a da direita à zona de relaxamento. ....	26
Figura 4.10 - Espectro de frequências para a posição $x=1.988m$ [2]. ....	27
Figura 4.11 - Espectro de frequências para a posição $x=1.988m$ para esta simulação... ..	27
Figura 5.1 - Perfil longitudinal (cima) e planta (baixo) do canal utilizado nos ensaios experimentais respectivas dimensões [16]. ....	30

Figura 5.2 - Vista lateral do canal de ondas (à esquerda), conjunto de 8 sondas de nível (primeira imagem ao centro), sondas de nível junto ao batedor (segunda imagem ao centro) e sondas de nível e ADV (à direita) [16]. .....	31
Figura 5.3 - Malha utilizada na simulação para o caso bidimensional sem rebentação, em cima, e pormenor da malha em baixo.....	32
Figura 5.4 - Canal numérico com as zonas de relaxamento destacadas a azul, estando a zona de geração no início do canal e a zona de dissipação no fim deste. ....	33
Figura 5.5 - Representação das posições das sondas de elevação (vermelho) e de velocidade (verde) para as posições $x=-10,-5,-2,1$ e $5m$ .....	34
Figura 5.6 - Elevação da superfície livre, $\eta$ , para uma onda de período $1.5s$ e altura de onda de $0.10m$ para as diferentes posições ao longo no canal. ....	35
Figura 5.7 - Espectros de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T=1.5s$ e $H=0.1m$ .....	36
Figura 5.8 - Altura significativa, $H_s$ , e período médio, $T_{av}$ , ao longo do domínio.....	37
Figura 5.9 - a) Evolução das componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos, para a posição $x=10, y=0$ e $z=-0.15m$ . b) Distribuição bidimensional das componentes da velocidade nos planos $xy, xz$ e $yz$ para a mesma posição, no lado esquerdo para o caso experimental e no lado direito para o caso numérico. ..	39
Figura 5.10 - Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano $xz$ do canal para o caso experimental (à esquerda) e caso numérico (à direita), para as posições $x=-10,-5,-2,1$ e $5, y=0$ e $z=-0.15m$ . ....	40
Figura 5.11 - Malha utilizada para esta simulação em cima e pormenor da malha em baixo. ....	41
Figura 5.12 - Canal numérico com as zonas de relaxamento destacadas a azul, estando a zona de geração no início do canal e a zona de dissipação no fim deste. ....	42
Figura 5.13 - Representação das posições das sondas de elevação para as posições $x=-10,-5-4,0$ e $4m$ . ....	43
Figura 5.14 - Elevação da superfície livre, $\eta$ , para uma onda de período $1.5s$ e altura de onda de $0.18m$ para as posições $x=-10.8m$ e $x=-5m$ [4]. ....	44
Figura 5.15 - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T=1.5s$ e $H=0.18m$ para caso numérico. ....	45
Figura 5.16 - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T=1.5s$ e $H=0.18m$ para caso experimental [4]. ....	45

Figura 5.17 - Altura significativa, $H_s$ , e período médio, $T_{av}$ , para o caso experimental [4] e numérico ao longo do domínio.....	46
Figura 6.1 - Malha 3D utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor dos elementos da malha lateral entre as posições $x=5$ e $x=8.3414m$ , em baixo.....	49
Figura 6.2 - Representação das zonas de relaxamento, destacadas em azul, no canal numérico.....	51
Figura 6.3 - Elevação da superfície livre, $\eta$ , para uma onda de período 1.5s e altura de onda de 0.10 m para as diferentes posições ao longo no canal. ....	52
Figura 6.4 - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T=1.5s$ e $H=0.1m$ .....	53
Figura 6.5 - Altura significativa, $H_s$ , e período médio, $T_{av}$ , ao longo do domínio.....	54
Figura 6.6 - a) Evolução das componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos, para a posição $x=10$ , $y=0$ e $z=-0.15m$ b) Distribuição bidimensional das componentes da velocidade nos planos $xy$ , $xz$ e $yz$ para a mesma posição, no lado esquerdo para o caso experimental e no direito para o caso numérico. ....	56
Figura 6.7 - Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano $xz$ do canal para o caso experimental (à esquerda) e caso numérico (à direita), nas posições $x=-10,-5,-2,1$ e $5$ , $y=0$ e $z=-0.15m$ .....	57
Figura 6.8 - Malha utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor da malha, em baixo.....	58
Figura 6.9 - Canal numérico com as zonas de relaxamento destacadas a azul, estando a zona de geração no início do canal e a zona de dissipação no fim deste. ....	60
Figura 6.10 - Elevação da superfície livre, $\eta$ , para uma onda de período 1.5s e altura de onda de 0.18m para as posições $x=-10.8$ e $x=-5m$ para os casos experimental [4] e numérico.....	62
Figura 6.11 - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T=1.5s$ e $H=0.18m$ para caso numérico. ....	63
Figura 6.12 - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T=1.5s$ e $H=0.18m$ para caso experimental, [4]. ....	63
Figura 6.13 - Altura significativa, $H_s$ , e período médio, $T_{av}$ , para o caso experimental, [4], e numérico ao longo do domínio. ....	64
Figura 6.14 - Malha utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor dos elementos da malha, em baixo.....	66

Figura 6.15 - Representação das zonas de relaxamento para o canal numérico utilizado nesta simulação. ....	67
Figura 6.16 - Elevação da superfície livre, $\eta$ , para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s, e altura de onda de 0.08 m para as diferentes posições ao longo no canal. ....	69
Figura 6.17 - Elevação da superfície livre para a posição $x=-10\text{m}$ e correspondente envelope teórico para uma onda bicromática de $T_1=1.5\text{s}$ , $T_2=1.1\text{s}$ e $H=0.08\text{m}$ . ....	69
Figura 6.18 - Altura significativa para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.08m entre as posições $x=-10\text{m}$ e $x=10\text{m}$ . ....	70
Figura 6.19 - Período significativo e médio para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.08m entre as posições $x=-10\text{m}$ e $x=10\text{m}$ . ....	70
Figura 6.20 - Espectros de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T_1=1.5\text{s}$ , $T_2=1.1\text{s}$ e $H=0.08\text{m}$ . ....	71
Figura 6.21 - a) Evolução das componentes da velocidade em função do tempo, durante o período de $8T_{\text{env}}$ (33s), para a posição $x=-10$ , $y=0$ e $z=-0.275\text{m}$ . b) Correspondentes espectros de amplitude para cada uma das componentes da velocidade. ....	73
Figura 6.22 - Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para os planos $xz$ , $xy$ e $yz$ do canal para o caso experimental (à esquerda) e caso numérico (à direita), para a posição $x=-10$ $y=0$ e $z=-0.275\text{m}$ . ....	74
Figura 6.23 - Distribuição da velocidade no plano bidimensional $xz$ para o caso numérico (esquerda), experimental (centro), [17], e teórico (direita), [17], para a posição $x=-10$ , $y=0$ e $z=-0.275\text{m}$ durante 16.5s ( $4T_{\text{env}}$ ). ....	74
Figura 6.24 - Malha utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor dos elementos da malha, em baixo. ....	76
Figura 6.25 - Representação das zonas de relaxamento para o canal numérico utilizado nesta simulação. ....	78
Figura 6.26 - Elevação da superfície livre, $\eta$ , para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s, e altura de onda de 0.05 m para as diferentes posições ao longo no canal, para o caso experimental [5] e numérico. ....	79
Figura 6.27 - Altura significativa para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.05m entre as posições $x=-10\text{m}$ e $x=10\text{m}$ . ....	80



Figura 6.28 - Período significativo e médio para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.05m entre as posições $x=-10\text{m}$ e $x=10\text{m}$ , para o caso numérico e experimental. ....	80
Figura 6.29 - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T_1=1.5\text{s}$ , $T_2=1.1\text{s}$ e $H=0.05\text{m}$ para o caso numérico.....	82
Figura 6.30 - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de $T_1=1.5\text{s}$ , $T_2=1.1\text{s}$ e $H=0.05\text{m}$ para o caso experimental.....	82



# Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Parâmetros que definem uma onda. ....	7
Tabela 2.2 - Equações que descrevem a teoria linear de ondas para diferentes condições de profundidade [7]. ....	10
Tabela 4.1 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução. ....	22
Tabela 4.2 - Propriedades da onda para o caso bidimensional de fundo horizontal. ....	23
Tabela 5.1 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução. ....	33
Tabela 5.2 - Propriedades da onda gerada. ....	34
Tabela 5.3 - Valores obtidos nos espectros de amplitude. ....	37
Tabela 5.4 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução. ....	41
Tabela 5.5 - Características da onda gerada para o caso bidimensional com rebentação. ....	42
Tabela 6.1 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas regulares sem rebentação. ....	50
Tabela 6.2 - Características da onda regular para o caso 3D sem rebentação. ....	51
Tabela 6.3 - Valores obtidos nos espectros de amplitude. ....	54
Tabela 6.4 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas regulares com rebentação. ....	59
Tabela 6.5 - Propriedades da onda simulada para o caso 3D com rebentação. ....	60
Tabela 6.6 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas bicromáticas com rebentação. ....	66
Tabela 6.7 - Características da onda bicromática gerada numericamente. ....	67
Tabela 6.8 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas bicromáticas sem rebentação. ....	77
Tabela 6.9 - Características da onda bicromática gerada numericamente. ....	78



## Nomenclatura

$A$	Amplitude
$C$	Celeridade da onda
$C_g$	Velocidade de grupo
$C_{env}$	Velocidade de envelope
$D$	Profundidade
$d$	Variável dimensional do canal de ondas do LNEC
$f$	Frequência
$g$	Aceleração da gravidade
$H$	Altura de onda
$H_S$	Altura significativa
$k$	Número de onda
$k_\alpha$	Curvatura da superfície
$L$	Comprimento de onda
$L_{env}$	Comprimento de envelope
$p$	Pressão
$u$	Componente da velocidade na direcção x
$v$	Componente da velocidade na direcção y
$V$	Vector da velocidade
$V_r$	Velocidade relativa
$w$	Componente da velocidade na direcção z
$S_i$	Termo fonte das equações de Navier-Stokes
$T$	Período
$T_{av}$	Período médio
$T_{env}$	Período de envelope
$T_S$	Período significativo
$t$	Tempo
$x$	Eixo x de referencial cartesiano
$y$	Eixo y do referencial cartesiano
$z$	Eixo z do referencial cartesiano

## Símbolos Gregos

$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\alpha$	Fracção de volume
$\rho$	Massa volúmica
$\Phi$	Propriedade do fluído (velocidade, densidade...)
$\vartheta$	Ângulo de fase
$\omega$	Frequência angular
$\eta$	Elevação da superfície
$\eta_{envelope}$	Elevação da superfície do envelope
$\varphi$	Potencial de velocidade
$\tau$	Tensor das tensões de Reynolds
$\sigma_\tau$	Coefficiente da tensão superficial

## Lista de Abreviaturas

CFD	<i>Computational Fluids Dynamics</i>
DFT	Transformada Discreta de Fourier
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GAMG	<i>Geometric-Algebraic Multi-Grid</i>
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
MULES	<i>Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution</i>
MUSCL	<i>Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws</i>
PBiCG	<i>Preconditioned Bi-Conjugate Gradient</i>
PISO	<i>Pressure Implicit with Split Operator</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier Stokes</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
VoF	<i>Volume of Fluid</i>

# *1º Capítulo*

## **Introdução**

### **1.1 Motivação**

Desde sempre que o ser humano mostrou grande interesse na actividade marítima como meio de sobrevivência, principalmente num país com uma extensão costeira tão grande no seu território, como é o caso de Portugal, onde esta actividade é muito importante a nível económico.

O mar é uma grande fonte de recursos naturais, desde a alimentação ao aproveitamento energético. Poderá também, em condições extremas, ser um perigo para as populações que se instalam junto à linha costeira, uma vez que é a acção do mar, juntamente com outras condições climáticas, que molda as praias e todo o litoral. É, então, muito importante para o homem conhecer e compreender melhor o seu comportamento. É aí que entra a hidrodinâmica, através do estudo e formulação de diversas teorias de ondas que descrevem as suas propriedades e a forma como estas se propagam ao longo da costa.

O conhecimento do modo como as ondas do mar se propagam, se transformam mediante determinadas condições e como rebentam são, pois muito importantes para projectos costeiros, desde o ordenamento da orla costeira, projecto de estruturas hidráulicas ou qualquer outro tipo de projecto de engenharia costeira.

Os modelos físicos e ensaios experimentais dão um enorme contributo para um melhor conhecimento deste fenómeno que é a propagação de ondas, mas devido ao seu custo, os modelos numéricos poderão ser uma ferramenta auxiliar muito útil para encontrar soluções alternativas, quando validados a partir de dados experimentais.

Entre um conjunto de códigos numéricos utilizados na simulação de propagação de ondas está o *OpenFoam* [1]. O código numérico do *OpenFoam* é uma ferramenta muito útil pois é gratuita e possui um código aberto que pode ser acedido e modificado pelo

utilizador. Foi criado com o intuito de resolver problemas na área de dinâmica de fluidos para sistemas operativos derivados do *Linux* (ex. *Ubuntu*). Possui um conjunto de *solvers* para simular complexos casos da dinâmica de fluidos, sendo que para a simulação de ondas existem os solvers *InterFoam* e o *Waves2Foam* que são baseados no método *VoF* (*Volume of Fluid*) que utiliza uma equação de transporte para determinar a fracção do fluído,  $\alpha$ , presente em cada elemento do fluido.

## 1.2 Objectivos

Esta dissertação teve o objectivo de validar o código numérico do *OpenFoam* para o estudo da hidrodinâmica, através da simulação de propagação de ondas, a partir de diferentes teorias e para diferentes condições iniciais. Essa validação foi feita através da realização de simulações baseadas em estudos experimentais de propagação e rebentação de ondas.

A simulação numérica pode ser uma ferramenta muito importante para o estudo da hidrodinâmica e para o projecto de estruturas costeiras, mas para que assim seja é necessário que os seus resultados se aproximem da realidade, é pois importante validar esta ferramenta numérica.

Assim, o primeiro objectivo desta dissertação foi de testar a instalação e bom funcionamento do *OpenFoam* e do seu *solver* de geração de ondas *Waves2Foam*, através da realização do mesmo caso de propagação de ondas num canal de fundo horizontal realizado por Moreira [2].

O segundo e principal objectivo desta dissertação passou por validar esta ferramenta para casos de propagação de ondas regulares com e sem ocorrência de rebentação, em simulações bidimensionais e tridimensionais. Esta validação teve como base ensaios experimentais realizados num canal com fundo de profundidade variável realizado por Conde *et al* [3] e por Neves *et al* [4], no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Após a validação do código numérico para o caso de ondas regulares, esta dissertação teve também o objectivo de validar este código para o caso de ondas complexas, através da simulação de ondas bicromáticas com e sem rebentação em casos tridimensionais. Também este caso teve como base ensaios experimentais realizados por Conde *et al* [5] num canal de fundo variável no LNEC.



### 1.3 Estrutura e organização da dissertação

A dissertação é constituída por 7 capítulos: introdução, teoria de ondas, modelos numéricos, seguido de 3 capítulos correspondentes às simulações realizadas e por fim um capítulo para conclusões.

No 2º capítulo é descrito o estudo bibliográfico realizado sobre os métodos físicos e teorias de ondas regulares, bicromáticas e rebentação de ondas.

No 3º capítulo descrevem-se as equações RANS e o método VoF, apresenta-se ainda o código numérico utilizado nesta dissertação para as simulações, *OpenFoam*, e o algoritmo PIMPLE.

No 4º capítulo são apresentados os resultados obtidos no caso de simulação de propagação de ondas regulares num canal bidimensional de fundo horizontal.

No 5º capítulo são apresentados os resultados obtidos para os dois casos simulados de propagação de ondas regulares num canal bidimensional de fundo variável para situações com e sem rebentação.

No 6º capítulo vem a validação do código numérico do *OpenFoam* para casos tridimensionais de propagação de ondas regulares e bicromáticas, em situação com e sem rebentação.

Por fim no 7º capítulo são apresentadas as conclusões sobre os casos simulados e perspectivas de trabalho futuro.



# ***2º Capítulo***

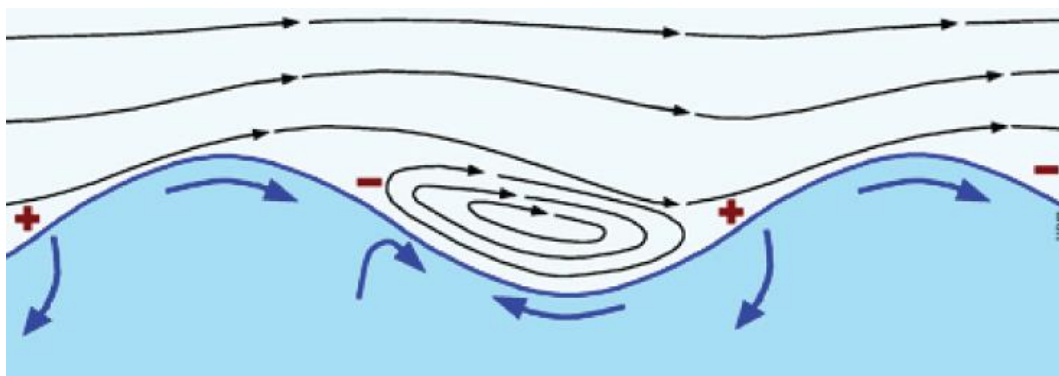
## **Teoria de ondas**

Neste capítulo são abordadas diferentes teorias de ondas que descrevem e caracterizam as propriedades destas, desde a sua geração, propagação e rebentação. As teorias descritas neste capítulo foram as utilizadas nas simulações numéricas, a teoria linear de ondas regulares, ou teoria de Airy, e a teoria de ondas complexas correspondente a ondas bicromáticas. É também abordado o fenómeno de rebentação de ondas.

### **2.1 Conceitos básicos de geração de ondas**

Para um melhor entendimento e compreensão sobre a hidrodinâmica marítima é necessário perceber conceitos básicos sobre ondas. Desde a forma como são geradas à sua propagação, a transformação que sofrem consoante a alteração das características do meio onde se propagam, a forma como interagem com a profundidade junto à linha costeira e como se comportam em rebentação.

As ondas da superfície do oceano, com períodos compreendidos entre os 3 e 25 segundos, são principalmente geradas pelo vento, através de uma interacção contínua na interface mar-atmosfera. Esta interacção dá-se devido a um aquecimento não uniforme da terra, que provoca a formação de gradientes térmicos, dando origem a deslocação de massas de ar que, ao contactarem a superfície da água, geram perturbações que se ampliam e se transformam em ondas. Na figura 2.1 encontra-se representada interacção entre o vento e a superfície livre do mar, dando-se a geração de ondas.



**Figura 2.1** - Interação mar-atmosfera, [6].

Quanto ao tipo de movimento que as ondas possuem, estas podem ser consideradas oscilatórias. Ondas que transportam partículas de água sem retornar à sua posição de origem são consideradas ondas de translação.

Estas ondas podem ser classificadas como ondas regulares, quando possuem características bem definidas, como amplitude e período constantes, ou ser classificadas como ondas irregulares quando se trata de um sistema de ondas com diferentes períodos e amplitudes.

Quando se dá a geração de ondas é transmitida energia do vento para estas. Esta energia é conservada durante a propagação de ondas até que a relação entre a altura de onda,  $H$ , e comprimento de onda,  $L$ , ( $H/L$ ) atinge um determinado valor limite, a partir do qual a onda se torna instável e inicia a sua rebentação. Durante a rebentação essa energia é dissipada.

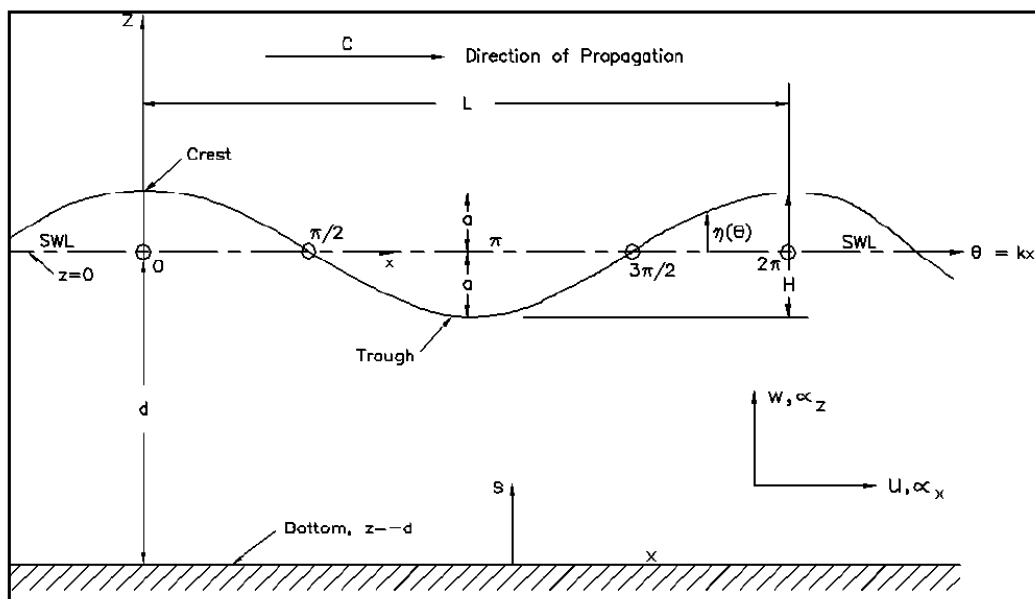
Para caracterizar fisicamente uma onda do mar é então necessário descrever a sua forma e o seu movimento sobre a superfície. Uma onda que pode ser descrita por um conjunto de equações matemáticas é considerada uma onda simples. Ondas monocromáticas e sinusoidais são exemplos de ondas simples pois o seu movimento pode ser descrito por simples funções de seno ou co-seno. Uma onda simples é periódica se o seu perfil de movimento se repetir em iguais períodos de tempo. Uma onda que se propaga na horizontal relativamente a um ponto fixo é considerada progressiva e a direcção por onde se propaga é considerada direcção de propagação. São este tipo de ondas simples e progressivas que são descritas na teoria linear de ondas. As ondas simples também podem ser conjugadas e formar um conjunto de ondas complexas. As ondas bicromáticas são um exemplo de ondas complexas pois resultam da combinação entre duas ondas monocromáticas.

Para descrever o movimento de uma onda, além da amplitude e período, é necessário conhecer outros parâmetros, como o tempo, o comprimento de onda e a profundidade. Na tabela 2.1 encontram-se os parâmetros principais utilizados para descrever uma onda progressiva.

**Tabela 2.1 - Parâmetros que definem uma onda.**

$A$ (m)	Amplitude
$T$ (s)	Período
$D$ (m)	Profundidade
$H$ (m)	Altura de onda
$\omega$ (rad/s)	Frequência angular
$C$ (m/s)	Celeridade
$k$ (rad/m)	Número de onda
$L$ (m)	Comprimento de onda
$\theta$	Fase

A altura de onda corresponde à distância que vai entre a crista, o ponto mais alto da onda, e a cava, o ponto mais baixo, a frequência angular,  $\omega$ , corresponde a  $2\pi/T$  e o número de onda,  $k$  corresponde a  $2\pi/L$ . Na figura 2.2 estão representados os parâmetros necessários para definir uma onda progressiva.



**Figura 2.2 - Representação de uma onda e seus parâmetros, [7].**

Uma onda progressiva pode ser representada pelas coordenadas temporal,  $t$ , e espacial,  $x$  ou pela combinação de ambas, definida como a fase da onda,  $\theta=kx-\omega t$ , sendo que os valores da fase variam entre 0 e  $2\pi$ .

## 2.2 Teoria linear de ondas (teoria de Airy)

A teoria linear de ondas foi desenvolvida em 1845 por Airy e trata-se da teoria mais simplificada e elementar que pode ser aplicada a ondas de pequena amplitude. É uma teoria que tem a vantagem de ser facilmente aplicada a grande parte dos problemas de engenharia e dá uma boa aproximação das características da onda para determinados parâmetros. A teoria de Airy é simplificada pois assume as seguintes suposições:

- O fluido é considerado homogéneo e incompressível;
- As tensões superficiais podem ser desprezadas;
- O efeito de Coriolis provocado pela rotação da terra é desprezado;
- A pressão é considerada uniforme e constante à superfície;
- O fluido é considerado como ideal e sem viscosidade;
- O escoamento é irrotacional;
- O fundo é uma fronteira horizontal, fixa e impermeável;
- A onda é de pequena amplitude e a sua forma é invariante no tempo e no espaço e considerada bidimensional;

As três primeiras simplificações são válidas para a resolução de quase todo o tipo de problemas de engenharia costeira. Ao assumir que o escoamento é irrotacional é possível utilizar a função matemática do potencial de velocidade,  $\Phi$ . Assim:

2.1

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x}$$

que corresponde à velocidade do fluido na direcção  $x$

2.2

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

que corresponde à velocidade do fluido na direcção  $z$ .

Consequentemente, se a função potencial da velocidade for conhecida em função do tempo, podem-se calcular as componentes da velocidade  $u$  e  $w$ .

A função potencial da velocidade satisfaz as equações de Laplace que governam os escoamentos para fluidos incompressíveis. A equação de Laplace para a velocidade potencial fica:

2.3

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0$$

A teoria linear de ondas dá bons resultados para ondas que se propagam em zonas muito profundas, uma vez que, para profundidades superiores a metade do comprimento de ondas,  $D > 0.5L$ , o efeito da profundidade não é sentido. Assim, em condições de profundidade elevada, a teoria de Airy pode ser descrita pelas seguintes equações:

2.4

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cdot \cos(kx - \omega t)$$

que corresponde ao perfil da elevação da superfície livre em função do tempo e do espaço. A velocidade com que uma forma de onda se propaga é a celeridade e é definida pela seguinte equação:

2.5

$$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$$

onde  $C$  corresponde à celeridade da onda.

Através da celeridade,  $C$ , e do período,  $T$ , pode-se então calcular o comprimento de onda:

2.6

$$L = \frac{gT^2}{2\pi}$$

As componentes  $u$  e  $w$  da velocidade podem ser calculadas pelas seguintes expressões:

2.7

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos(kx - \omega t)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin(kx - \omega t)$$

Quando a profundidade relativa,  $D/L$ , é inferior a 0.5, as características da onda passam a ser dependentes da profundidade. As ondas podem ser classificadas então em três zonas, uma zona de águas profundas onde a profundidade não tem influência, uma zona transitória de águas intermédias para profundidades relativas compreendidas entre os 0.5 e 0.05 e uma zona de águas pouco profundas para profundidades relativas inferiores a 0.05. A forma das equações que regem a teoria de Airy para cada uma destas zonas encontra-se resumida na tabela 2.2.

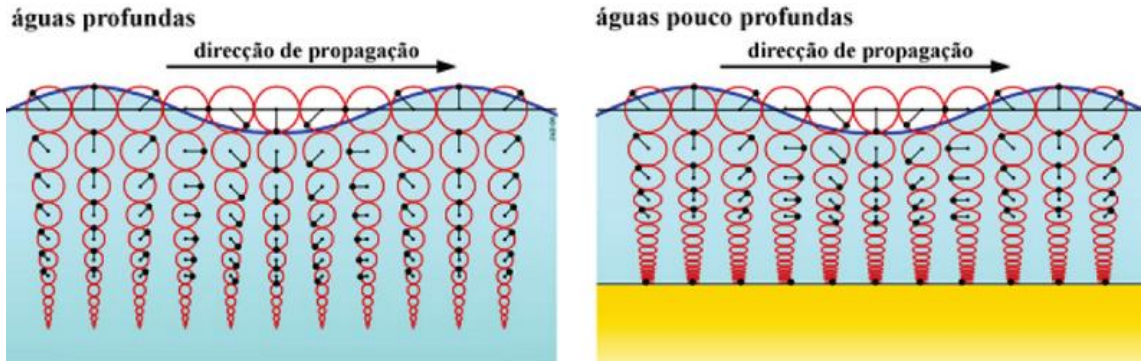
**Tabela 2.2 - Equações que descrevem a teoria linear de ondas para diferentes condições de profundidade [7].**

	Águas pouco profundas	Águas intermédias	Águas profundas
$\eta$	$\eta(x, t) = \frac{h}{2} \cdot \cos(\theta)$		
$C$	$C = \frac{L}{T} = \sqrt{gL}$	$C = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$C = \frac{L}{T} = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}}$
$L$	$L = T\sqrt{gD} = CT$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} = CT$
$u$ $w$	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{D}} \cos(\theta)$ $w = \frac{H\pi}{T} \left(1 + \frac{z}{D}\right) \sin(\theta)$	$u$ $= \frac{H}{2} \cdot \frac{gT}{L} \cdot \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+D)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)} \cdot \cos(\theta)$ $w$ $= \frac{H}{2} \cdot \frac{gT}{L} \cdot \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+D)}{L}\right]}{\cosh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)} \cdot \sin(\theta)$	$u = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \cos \theta$ $w = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{\left(\frac{2\pi z}{L}\right)} \sin(\theta)$

A teoria de Airy descreve as ondas progressivas como sendo do tipo oscilatório e sem transporte de massa, sendo que as partículas da água possuem então trajectórias circulares quando as ondas se propagam em águas muito profundas. Quando entram em águas intermédias, a profundidade começa também a influenciar a trajectória das



partículas, tornando-as elípticas. A figura 2.3 mostra o efeito da profundidade da trajectória das partículas da água.



**Figura 2.3** - Efeitos da profundidade na trajectória das partículas da água, no lado direito para águas profundas e no lado esquerdo para águas pouco profundas, [6].

## 2.3 Ondas bicromáticas

As ondas bicromáticas são ondas complexas que resultam da combinação de duas ondas regulares monocromáticas.

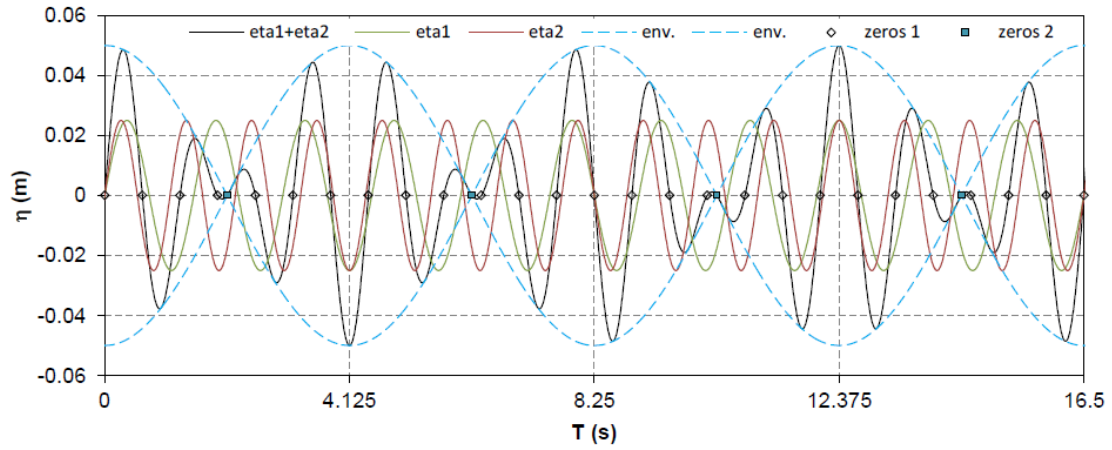
O estudo de ondas bicromáticas nesta dissertação é baseado na combinação de duas ondas monocromáticas respeitando a teoria linear de Airy. Assim, os parâmetros que descrevem estas ondas bicromáticas são os mesmos descritos anteriormente na teoria de ondas lineares.

A equação que descreve o perfil da elevação da superfície para uma onda bicromática resulta, então, da soma dos perfis das duas ondas monocromáticas:

2.9

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_1} - \frac{2\pi t}{T_1}\right) + \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_2} - \frac{2\pi t}{T_2}\right)$$

Onde os índices 1 e 2 representam cada uma das ondas monocromáticas. A altura de onda é considerada igual para as duas ondas monocromáticas para simplificar. Como as duas componentes de comprimento de onda,  $L_1$  e  $L_2$ , são diferentes, para algumas posições,  $x$ , num determinado momento,  $t$ , as componentes vão estar em fase e a altura da onda observada vai ser igual à soma da altura para as duas ondas monocromáticas, ou seja,  $2H$ . Para outras posições  $x$ , as duas ondas vão estar em fases opostas e o resultado vai ser de uma altura de onda resultante nula. O perfil da onda bicromática resultante da equação 2.9 está representado na figura 2.4.



**Figura 2.4** - Perfil de uma onda bicromática (a preto) resultante de duas ondas monocromáticas (verde e vermelho) e correspondente envelope (linha a azul tracejada), [5].

Ao observar-se a figura verifica-se que as ondas bicromáticas movimentam-se em grupos, formando o envelope (linha a azul tracejada). O envelope é caracterizado por apresentar ora simetria ora anti-simetria por período, sendo que ao fim de um determinado número de períodos repete-se. O perfil de envelope é dado pela seguinte equação:

2.10

$$\eta_{envelope} = \pm H \cdot \cos \left[ \pi \cdot \left( \frac{L_2 - L_1}{L_1 \cdot L_2} \right) x - \pi \cdot \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2} \right) t \right]$$

A velocidade de uma onda bicromática é definida pela velocidade de grupo,  $C_g$ , que normalmente não é idêntico à velocidade individual de cada uma das ondas monocromáticas. A velocidade de grupo corresponde à velocidade com que o grupo de ondas do envelope viaja é dada pela seguinte equação [7]:

2.11

$$C_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{env}}{T_{env}} \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi D}{L_{env}}}{\sinh\left(\frac{4\pi D}{L_{env}}\right)} \right] = n \cdot C_{env}$$

com

2.12

$$n = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi D}{L_{env}}}{\sinh(\frac{4\pi D}{L_{env}})} \right]$$

Para águas profundas o termo  $(4\pi D/L)/\sinh(4\pi L)$  é aproximadamente zero, logo a velocidade de grupo fica:

2.13

$$C_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{env}}{T_{env}} = \frac{1}{2} \cdot C_{env}$$

Para águas pouco profundas o termo  $\sinh(4\pi L) \approx (4\pi d/L)$  ficando:

2.14

$$C_g = \frac{L_{env}}{T_{env}} = C_{env} \approx \sqrt{gd}$$

A velocidade de grupo é importante pois é com esta velocidade que a energia das ondas é propagada.

O período do envelope é dado pela seguinte equação:

2.15

$$T_{env} = \frac{T_2 - T_1}{T_1 \cdot T_2}$$

## 2.4 Rebentação de ondas

O fenómeno de rebentação de ondas é um fenómeno complexo muito estudado na área da mecânica de ondas. As ondas, ao aproximarem-se da costa, sofrem uma transformação onde o comprimento de onda,  $L$ , diminui e a sua altura,  $H$ , aumenta, fazendo que a relação  $H/L$  aumente consideravelmente. Essa relação, ao atingir um determinado limite, provoca a rebentação da onda, dissipando a energia que estas transportavam.

A altura de onda é limitada pelo seu comprimento bem como pela profundidade onde esta se propaga. Para um dado valor de profundidade e período, existe uma altura de onda máxima para que a onda se propague sem que ocorra rebentação. Para valores superiores a esse limite, a onda torna-se instável e pode ocorrer a sua rebentação. Esse limite máximo de altura para o qual pode ocorrer a rebentação é denominado de altura de rebentação da onda e é, para águas profundas, uma função do comprimento de onda. Para águas pouco profundas e intermédias, a altura de rebentação torna-se dependente tanto da profundidade como do comprimento de onda.

A forma como uma onda rebenta depende das características do meio onde ela se propaga e das suas propriedades, podendo ser classificada em quatro tipos de rebentação: Progressiva ou deslizante (*spilling breaker*) que ocorre em zonas pouco profundas e de baixo declive, tubular (*plunging breaker*) que se dá para zonas pouco profundas e de grande declive, de fundo (*surging breaker*) para fundos de declive muito elevado e do tipo de colapso (*collapsing breaker*) que é um tipo intermédio de rebentação entre a tubular e a de fundo, [8].

# 3º Capítulo

## Modelos numéricos

### 3.1 Mecânica dos Fluidos Computacional

Uma definição dada por Versteeg e Malalasekera [9] diz que a Mecânica dos Fluidos Computacionais, ou CFD, é um ramo da engenharia que consiste na análise de problemas na área da dinâmica dos fluidos recorrendo à simulação numérica através de recursos computacionais.

O CFD produz resultados muito bons e aproximados da realidade para a simulação de escoamentos de fluidos através da utilização de métodos matemáticos e métodos numéricos.

No que diz respeito aos métodos matemáticos, os aspectos físicos do escoamento ficam definidos pelos princípios da conservação da massa, da continuidade de movimento e da conservação de energia. O escoamento de um fluido tanto pode ser estudado em regime laminar ou em regime turbulento, sendo que para esta dissertação as simulações foram todas realizadas em regime laminar. Os escoamentos compressíveis e incompressíveis para ambos os regimes laminares ou turbulentos podem ser descritos pelas equações de Navier-Stokes. São estas equações que definem o campo de pressão e velocidade para um dado escoamento. De seguida são apresentadas as equações de Navier-Stokes para fluidos incompressíveis e viscosidade constante:

3.1

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \cdot g_x + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

3.2

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho \cdot g_y + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

3.3

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial w}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial w}{\partial y} + w \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \cdot g_z + \mu \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade e  $\rho$  a massa volúmica. A conservação da massa de escoamentos de fluidos fica definida pela equação da continuidade:

3.4

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

onde  $\mathbf{V}$  é o vector da velocidade. Para um fluido incompressível a equação da conservação da massa fica:

3.5

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Já a equação da conservação da quantidade de momento para escoamento de fluidos incompressíveis é definida por:

3.6

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho \cdot (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla \cdot \mathbf{p} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + S_i$$

sendo que  $S_i$  é o termo que engloba as forças aplicadas no volume de controlo,  $\mu \nabla^2 \mathbf{V}$  é o termo da viscosidade e  $-\nabla \cdot \mathbf{p}$  é o termo da pressão sem incluir a pressão hidrostática.

Os modelos numéricos utilizam algoritmos e métodos para substituir os princípios matemáticos fundamentais descritos em cima por equações simplificadas com formas algébricas discretas, que depois são resolvidos para obter valores do campo de fluxo em pontos distintos do espaço e do tempo.

O código CFD é constituído por 3 elementos principais: o pré-processador que serve para definir as condições de fronteira e iniciais e definir o domínio computacional através da geração da malha, o *solver* que resolve as equações dos métodos numéricos e o pós processamento que serve para analisar os resultados.

### 3.2 Equações RANS

As equações que governam os escoamentos turbulentos com interface água-ar são as equações de RANS, ou *Reynolds Average Navier-Stokes*:

3.7

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}^T) = -\nabla \cdot \mathbf{p} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \cdot \nabla \cdot \rho + \nabla \cdot [\mu \cdot \nabla \cdot \mathbf{V} + \rho \cdot \boldsymbol{\tau}] + \sigma_\tau \cdot k_\alpha \cdot \nabla \alpha$$

onde  $\mathbf{V}$  é o vector da velocidade,  $\boldsymbol{\tau}$  é o tensor das tensões de Reynolds, o último termo da equação é o efeito da tensão superficial, onde  $\sigma_\tau$  é o coeficiente da tensão superficial,  $k_\alpha$  é a curvatura da superfície e  $\alpha$  a fracção de volume.

### 3.3 Método VoF

O método VoF (*Volume of Fluid*) é um método de cálculo para determinar a fracção da superfície livre do fluido, aplicado a uma malha fixa, para casos onde se dá o escoamento de dois fluidos ou fases. Este método utiliza uma equação de transporte para determinar a fracção de volume,  $\alpha$ , presente em cada elemento de fluido. A fracção de volume toma valores compreendidos entre  $0 < \alpha < 1$ , sendo que 0 corresponde a uma fase ou fluido e 1 à outra fase ou outro fluido. Para a superfície livre, normalmente a fracção de volume toma o valor aproximado de 0.5, não ficando exactamente definida por uma linha, mas por uma gama de valores que definem uma região que forma a superfície livre. A equação de transporte que determina a fracção de volume de cada fase é dada por [10]:

3.8

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \cdot \mathbf{V}) + \nabla \cdot [\alpha(1 - \alpha)\mathbf{V}_r] = 0$$

sendo que o termo  $\mathbf{V}_r$  diz respeito à velocidade relativa. Já as propriedades físicas do escoamento são determinadas através de médias ponderadas com base na seguinte equação:

3.9

$$\phi = \alpha \cdot \phi_{\text{água}} + (1 - \alpha) \cdot \phi_{\text{ar}}$$

onde  $\phi$  é uma propriedade do fluido, como por exemplo, a densidade ou a viscosidade.

### 3.4 Código numérico do *OpenFoam*

*OpenFoam* (*Open Fluid Operation and Manipulation*) [1], trata-se de um dos códigos numéricos do CFD, um programa de simulação numérica desenvolvido para resolver problemas da dinâmica dos fluidos para sistemas operativos do *Linux* (ex. *Ubuntu*). No entanto, também é possível ser executado noutros sistemas operativos recorrendo às máquinas virtuais.

O *OpenFoam* é uma ferramenta muito útil pois trata-se de um código livre e aberto onde cada utilizador pode aceder e modificar consoante a natureza do problema, desde que se referencie os devidos autores.

O *OpenFoam* é uma biblioteca em C++ com a função primária de criar executáveis, conhecidos por aplicações, sendo que estas aplicações dividem-se em 2 categorias, os *solvers*, que resolvem os problemas da dinâmica dos fluidos, e os utilitários, que servem para a manipulação e processamento. Possui um conjunto de *solvers* para simular complexos problemas para distintas áreas da dinâmica dos fluidos.

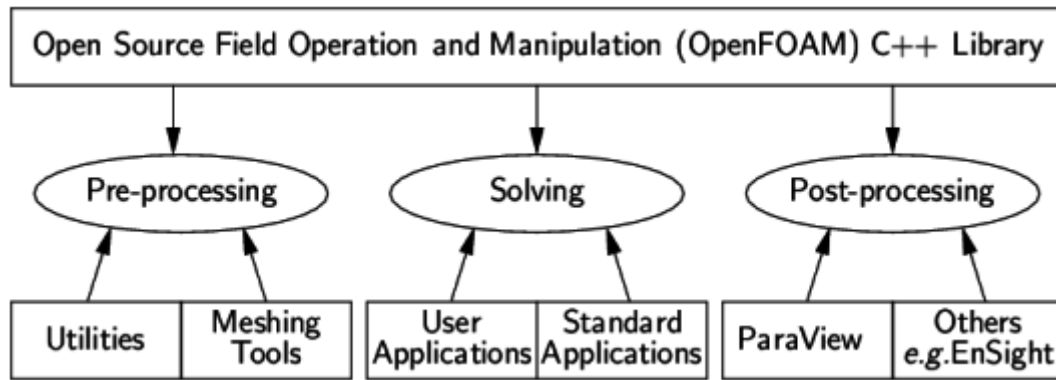
O *OpenFoam* inclui ainda no seu código ferramentas de pré-processamento e pós-processamento, sendo que não possui nenhuma interface gráfica, como tal, os resultados podem ser observados e processados com recurso a um programa auxiliar, o *Paraview*.

Por não possuir interface gráfica, no pré-processamento, as condições iniciais e fronteira ficam definidas através de um conjunto de ficheiros de texto, que se encontram guardados dentro de pastas na directoria do caso que se pretende simular.

As malhas podem ser geradas no *OpenFoam* recorrendo a uma ferramenta, *blockMesh*, para malhas de geometria simples, ou recorrendo mais uma vez a programas auxiliares, os programas de geração de malhas.

Para esta dissertação foi utilizada a versão 2.2.1 do *OpenFoam* no sistema operativo *Ubuntu 12.04 Lts* com recurso a uma máquina virtual. A estrutura do *OpenFoam* está resumidamente representada na figura 3.1:





**Figura 3.1** - Estrutura do *OpenFoam* [11].

### 3.5 Solver *Waves2Foam*

O *OpenFoam* inclui uma larga gama de *solvers* desenhados para uma específica classe de problemas. As equações e algoritmos diferem de um *solver* para outro, para que a selecção de um *solver* permita o utilizador fazer algumas escolhas iniciais, para a modelação do seu problema específico [12].

O *solver* utilizado nesta dissertação foi o *Waves2Foam*. Trata-se de um *solver* criado por Niels Jacobsen [13] para a resolução de problemas de geração de ondas. É um *solver* baseado em um outro *solver* do *OpenFoam*, o *interFoam*, que utiliza as equações RANS para dois fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis, acoplado ao método VoF para resolver problemas de escoamentos de fluidos bifásicos separados por uma superfície livre.

O *interFoam* utiliza ainda um método que tem o intuito de manter os limites da fracção da fase independentes dos esquemas numéricos subjacentes, esse método é denominado de método MULES (*Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution*).

Além das características que definem o *interFoam*, o *Waves2Foam* inclui ainda uma técnica de zonas de relaxamento, que inclui uma zona de geração de ondas e outra de dissipação, para que as ondas reflectidas pelas fronteiras do domínio ou por efeito numérico não tenham efeitos de contaminação dos resultados. Além das zonas de relaxamento, possui ainda uma grande gama de teoria de ondas disponível para cada caso específico, sendo que ainda podem ser adicionadas novas teorias, desde que as equações e as expressões algébricas estejam presentes no código.

A livraria do *Waves2Foam* inclui ainda um conjunto de ferramentas de pré-processamento para a definição da teoria de onda a utilizar, das condições fronteiras e iniciais, zonas de relaxamento e parâmetros da onda a ser gerada conforme a teoria de onda seleccionada. Possui também ferramentas de pós-processamento para análise de resultados obtidos, que permite criar um ficheiro de sondas livres e distribui-las ao longo do domínio para registar a evolução da superfície livre em função do tempo.

### 3.6 Algoritmo PIMPLE

Um algoritmo é um processo iterativo que avalia uma solução inicial, corrigindo-a até ao resíduo atingir a precisão desejada.

O algoritmo utilizado pelo *solver Waves2Foam* é o algoritmo PIMPLE. Trata-se de um caso particular que deriva dos algoritmos PISO e SIMPLE, utilizado na resolução das equações de Navier-Stokes. Possui a particularidade de efectuar ciclos múltiplos de iterações, no mesmo intervalo de tempo, usando o valor da última iteração como estimativa inicial para a próxima iteração. Essa particularidade é denominada *Outler Correction Loops*.

O algoritmo PIMPLE possui as seguintes características do PISO:

- Definição das condições fronteira;
- Resolução da equação da quantidade de movimento para obter um campo de velocidades intermédio;
- Resolução da equação da pressão;
- Correção do fluxo de massa nos volumes de controlo;
- Correção das velocidades em função do campo de pressão;
- Actualização das condições fronteira.

# 4º Capítulo

## Propagação de ondas num canal bidimensional de fundo horizontal

Neste capítulo é apresentado um caso de geração de ondas bidimensionais num canal de fundo horizontal, realizado com o intuito de testar a instalação e bom funcionamento do código numérico do *OpenFoam* e da ferramenta de geração de ondas *Waves2Foam*. Trata-se do mesmo caso estudado por Moreira [2].

### 4.1 Simulação de ondas num canal bidimensional com fundo horizontal

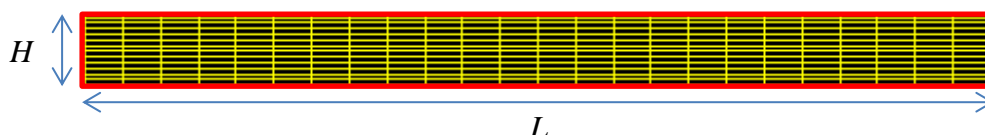
Para a verificação do bom funcionamento da ferramenta *Waves2Foam* é então criado um canal bidimensional com fundo horizontal, onde são geradas ondas regulares de primeira ordem com profundidade considerada infinita, com o intuito de observar como se propaga a onda ao longo do tempo e no espaço. Estes resultados são depois comparados com os dados numéricos obtidos por Moreira [2].

#### 4.1.1 Descrição da malha e esquemas numéricos

A malha é criada com base nas especificações do caso de [2], recorrendo a um programa de geração de malhas. O canal bidimensional possui então um comprimento de 13.134 m e largura de 0.625 m, sendo constituído por 223550 volumes de controlo, do tipo de elementos quadrangulares com distribuição não uniforme. De forma a possuir 10 elementos por altura de onda, a malha possui uma zona com elementos mais densa na zona do nível de água, centrada em  $y=0$ . Na figura 4.2 é possível observar-se o tipo de elementos constituintes da malha e a sua distribuição. Na figura 4.1 está a malha final utilizada nesta simulação, como se pode observar é uma malha muito densa, sendo que não se conseguem distinguir os elementos desta.



**Figura 4.1** - Malha utilizada para a simulação no caso bidimensional.



**Figura 4.2** - Pormenor da malha do canal bidimensional com fundo horizontal na zona de propagação da onda.

Na tabela 4.1 estão os algoritmos [14] e esquemas numéricos [15] utilizados nesta simulação.

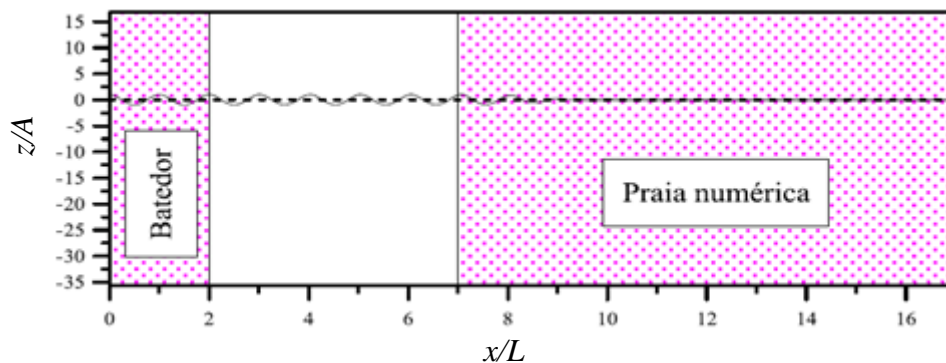
**Tabela 4.1** - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução.

Esquemas Numéricos	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes
	Discretização dos termos gradientes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos Laplacianos
Esquemas de Interpolação	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
Algoritmos de Resolução	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da velocidade
	Equação da fracção de volume

#### 4.1.2 Condições de fronteira e iniciais do canal bidimensional

Como condição fronteira definiram-se duas zonas de relaxamento, de geração e dissipação de ondas, sendo a zona de geração colocada à entrada do canal, com o comprimento definido por [2] de  $2L$ , correspondente a 1.592 m. A zona de dissipação

está colocada à saída do domínio, e possui um comprimento de  $10L$ , correspondente a 7.96 m. Para o fundo do canal definiu-se a condição de velocidade nula. Para o termo da pressão o gradiente é considerado nulo e para o topo considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A cota da superfície de água encontra-se em  $y=0$ , sendo que no instante  $t=0$ , a superfície encontra-se na horizontal, sem se verificar a propagação de ondas. Na figura 4.3 pode-se observar uma descrição da geometria do canal e das zonas de relaxamento.



**Figura 4.3** - Caracterização do domínio numérico, adaptado [2].

A onda gerada nesta simulação corresponde a uma onda regular de primeira ordem, correspondente à teoria de Airy, e possui as características apresentadas na tabela 4.2.

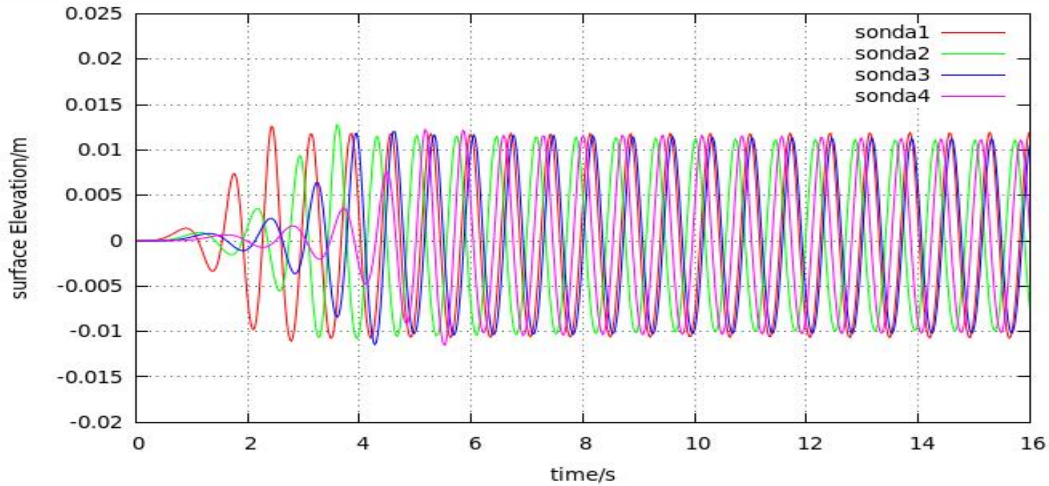
**Tabela 4.2** - *Propriedades da onda para o caso bidimensional de fundo horizontal.*

Propriedades da onda regular de primeira ordem	
$D$	0.425m
$f$	1.4Hz
$H$	0.0238m
$L$	0.796m

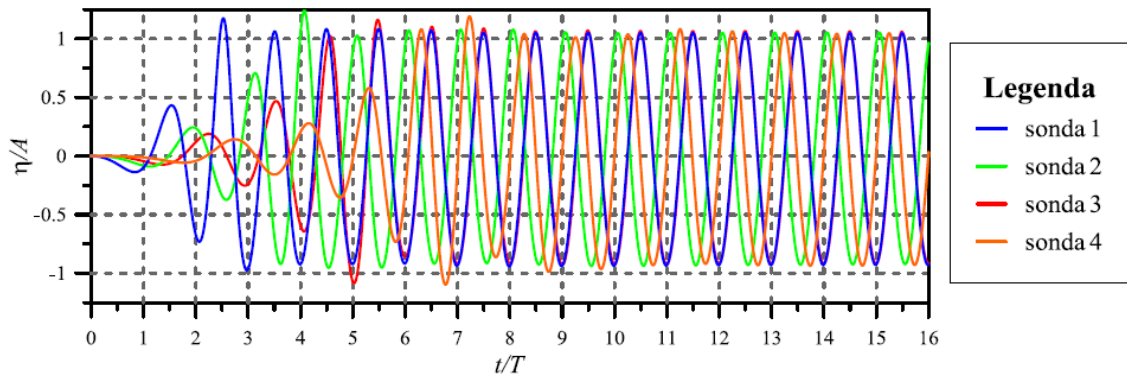
### 4.1.3 Análise e comparação de resultados

Os resultados obtidos para esta simulação são aqui apresentados em comparação com os resultados obtidos por [2]. A elevação da superfície livre ao longo do canal foi analisada através da colocação de 4 sondas nas posições  $x_1=1.988\text{m}$ ,  $x_2=2.4431\text{m}$ ,  $x_3=2.7935\text{m}$  e  $x_4=3.3943\text{m}$ . Deste modo, é analisada a elevação em função do tempo,

para 4 posições diferentes no domínio. Na figura 4.4 encontram-se os resultados obtidos através desta simulação e na figura 4.5 os resultados obtidos por [2]. Nos resultados apresentados por [2], o tempo foi adimensionalizado com período e a elevação com a amplitude.



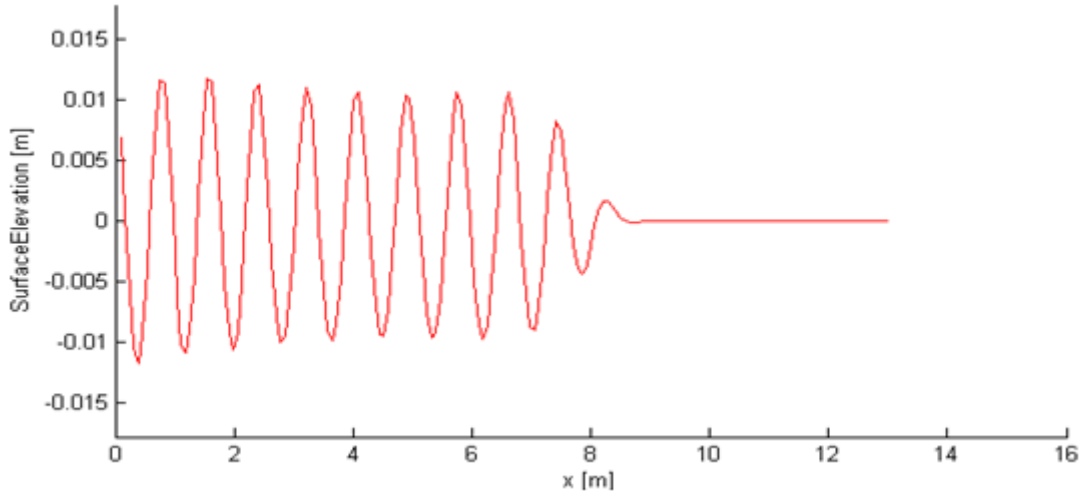
**Figura 4.4** - Elevação da superfície ao longo do tempo, para as 4 sondas distribuídas ao longo do domínio.



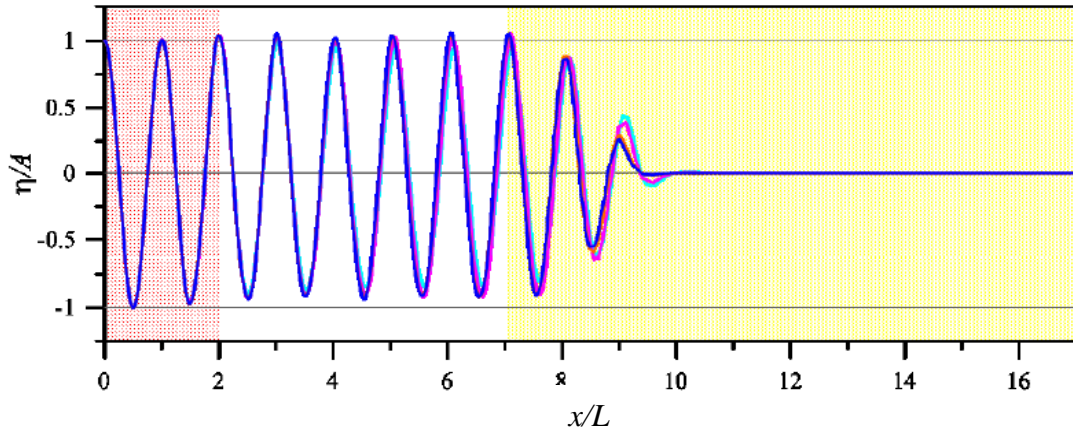
**Figura 4.5** - Elevação da superfície ao longo do tempo, através de 4 sondas igualmente distribuídas ao longo do canal [2].

Fazendo uma comparação entre os resultados apresentados nas duas figuras, pode-se concluir que os resultados obtidos foram bastante semelhantes. Verifica-se que a propagação da onda alcança primeiro a sonda 1, e posteriormente as restantes sondas. Tal como aconteceu em [2], a elevação medida pelas sondas 1 e 3 encontram-se praticamente sobrepostas devido ao facto de estarem separadas por uma distância correspondente a  $1L$ . Verifica-se também que a propagação da onda estabiliza ao fim de aproximadamente 6s, valor que, sendo adimensionalizado pelo período, corresponde a aproximadamente 8 períodos, o mesmo obtido por [2].

Também foi analisada a elevação da superfície ao longo do domínio, para o instante de tempo  $t=17s$ . O resultado encontra-se registado nas figuras 4.6 e 4.7. A figura 4.6 corresponde à elevação da superfície para esta simulação e a figura 4.7 corresponde ao resultado obtido em [2], mais uma vez com valores adimensionalizados, onde  $t=17s$  corresponde ao instante  $t/T=24$ .



**Figura 4.6** - Elevação da superfície ao longo do domínio para o instante  $t=17s$ .

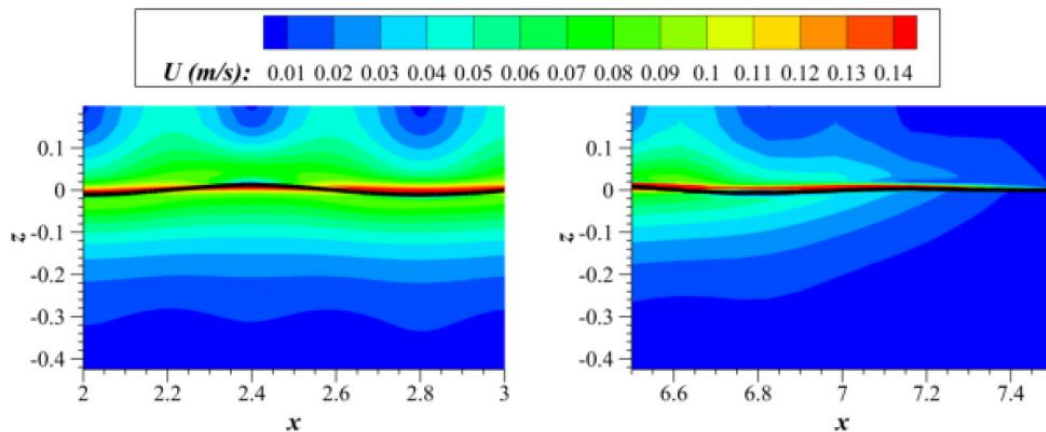


**Figura 4.7** - Elevação da superfície livre no instante  $t/T=24$  para as diferentes malhas testadas por [2].

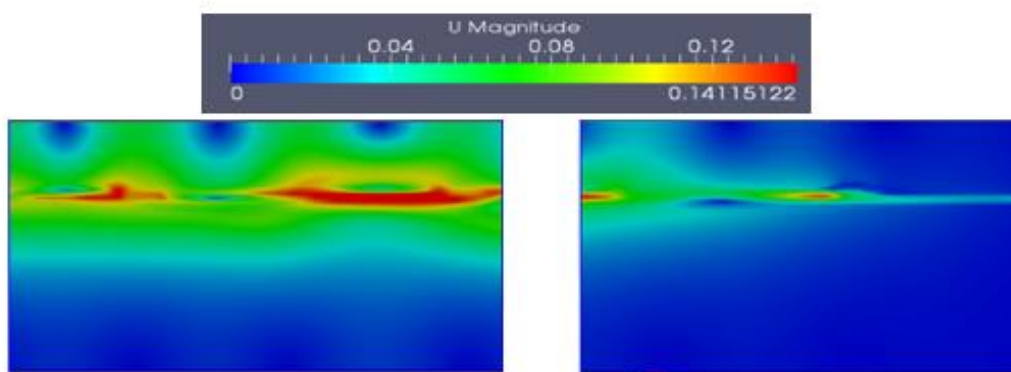
Comparando os resultados verifica-se mais uma vez que são bastante semelhantes como esperado. À saída da zona de geração, a onda propaga-se de uma forma regular, com período e amplitude constante, como seria previsto pela teoria de Airy. Também se pode observar o efeito da zona de relaxamento à saída do canal, com a onda a começar a dissipar energia a partir da posição  $x=7.96m$ , sendo que para  $x=9m$  já não se verifica a propagação de onda, estando a superfície na horizontal e sem perturbações. Pode-se concluir então que a zona de relaxamento para a dissipação de energia não precisava de

ser tão comprida, um comprimento de  $3L$  chegaria para dissipar completamente e tornar a elevação nula.

Além da elevação da superfície também foi analisada a distribuição da magnitude da velocidade, para o mesmo instante considerado em cima. Através da análise das figuras 4.8 e 4.9 verifica-se que, tal como em [2], a velocidade tende a ser nula a partir da zona de dissipação, quando já não existe propagação da onda.



**Figura 4.8** - Distribuição da magnitude da velocidade para o instante de tempo  $t=17s$ , sendo a primeira imagem na zona de propagação da onda e a segunda, no lado direito, na zona de relaxamento. Resultados obtidos por [2].

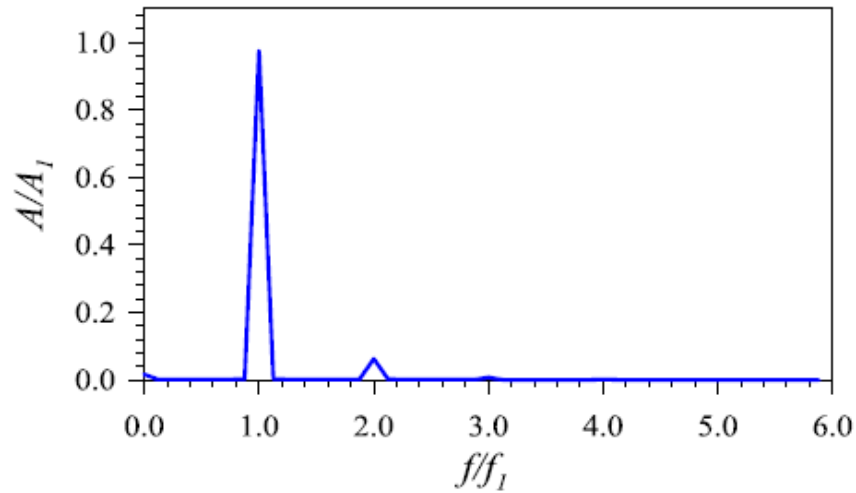


**Figura 4.9** - Distribuição da magnitude da velocidade para o instante  $t=17s$  obtida nesta simulação, a imagem à esquerda é referente à zona de propagação e a da direita à zona de relaxamento.

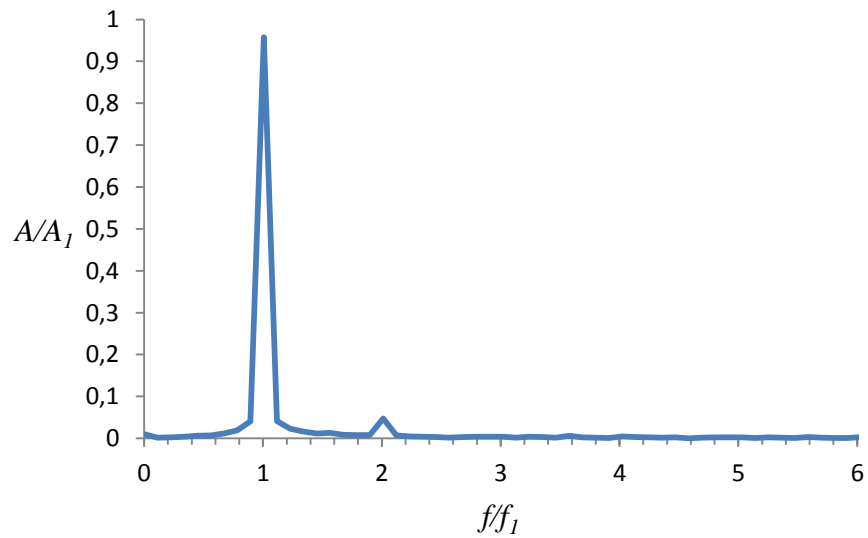
Por fim realizou-se também uma análise espectral de frequências para a elevação da superfície obtida através da sonda na posição  $x=1.988m$ . A taxa de aquisição de dados para esta análise foi de 256 dados por período. O espectro de frequências foi criado através da transformada rápida de Fourier (FFT), uma ferramenta do *Microsoft Excel*. Para o espectro de frequências a amplitude é adimensionalizada através da amplitude da



frequência fundamental, 0.0119 m, e a frequência é adimensionalizada através da frequência fundamental, 1.4Hz, como em [2]. Mais uma vez, os resultados obtidos foram idênticos, como pode ser observado nas figuras 4.10 e 4.11, o que indica o bom funcionamento do código numérico.



**Figura 4.10** - Espectro de frequências para a posição  $x=1.988\text{m}$  [2].



**Figura 4.11** - Espectro de frequências para a posição  $x=1.988\text{m}$  para esta simulação.



# 5º Capítulo

## Propagação de ondas num canal bidimensional de fundo variável

Neste capítulo, são apresentadas duas simulações numéricas de propagação de ondas regulares num canal bidimensional de fundo variável, realizado com o intuito de observar o efeito da profundidade na propagação de ondas. Este efeito que a profundidade tem na propagação de ondas e as características da transformação e rebentação destas são muito importantes para os estudos hidrodinâmicos e projecto de estruturas costeiras. Os casos são baseados em ensaios experimentais efectuados por Conde *et al* [3], onde foram geradas ondas regulares, num canal com um fundo variável, sem ocorrência de rebentação, e por Endres *et al* [4], onde foram geradas ondas regulares no mesmo canal, mas neste caso com rebentação. Ambos os ensaios foram realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Este caso serve também para a validação da ferramenta *Waves2Foam*, através da comparação dos resultados com os dados experimentais.

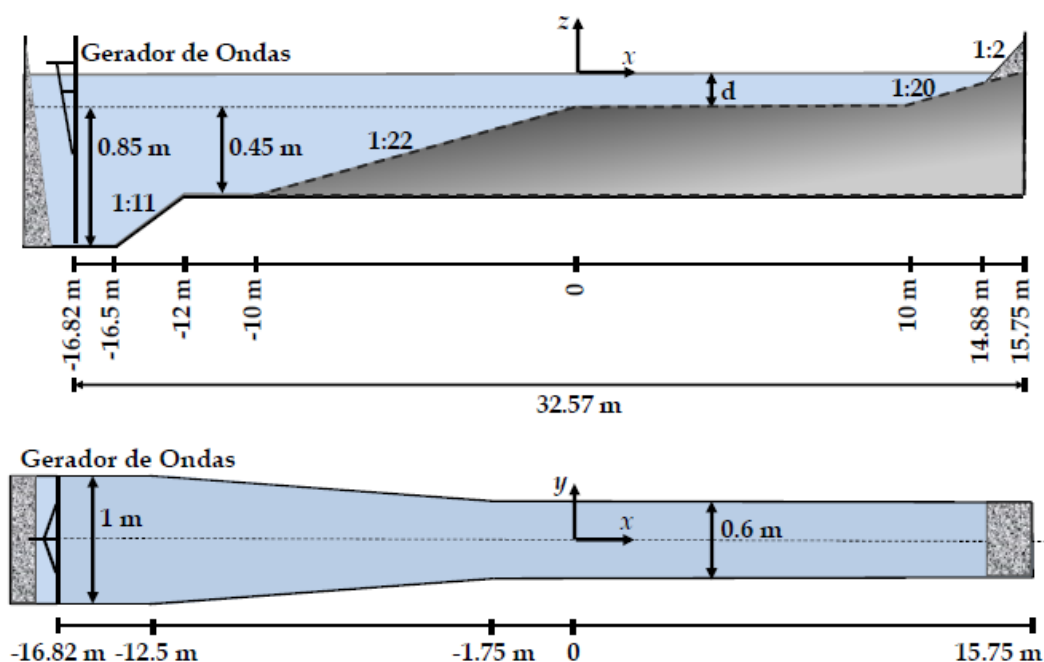
Para a validação da ferramenta *Waves2Foam* é então criado um canal bidimensional com fundo variável, seguindo a mesma geometria da secção do canal utilizado no ensaio experimental por Conde *et al* [3], onde foram geradas ondas regulares de primeira ordem, fazendo variar a profundidade do canal, de forma a verificar a ocorrência ou não de rebentação. Os resultados obtidos são depois comparados com os dados dos ensaios experimentais.

### 5.1 Descrição dos ensaios experimentais

Os ensaios experimentais foram todos realizados num canal de ondas, com fundo de batimetria variável, do LNEC, com 32.57m de comprimento útil. Foram então geradas ondas regulares para situações de propagação com e sem rebentação. Para a situação sem ocorrência de rebentação as ondas geradas possuíam um período de 1.5s, altura de onda de 0.1m e profundidade na zona de geração de 1.15m. Na situação com rebentação

o período é idêntico ao caso anterior, sendo neste caso a altura de onda de 0.18m e a profundidade na zona de geração de 0.95m.

O canal utilizado para os ensaios experimentais e as suas dimensões encontram-se representados na figura 5.1. De modo a minimizar o aparecimento de ondas transversais durante os ensaios, melhorar o seu comportamento hidráulico e ainda para aumentar a altura das ondas geradas, o canal foi projectado com uma redução de área da secção transversal como indica a figura.



**Figura 5.1** - Perfil longitudinal (cima) e planta (baixo) do canal utilizado nos ensaios experimentais respectivas dimensões [16].

As ondas foram geradas no canal através de um gerador de ondas do tipo de pistão controlado por uma placa A/D ligada a um computador pessoal. O canal é constituído por 3 rampas, como mostra a figura 5.1, a primeira com declive de 1:11, a segunda com 10 metros de extensão e declive de 1:22 e a partir dos 10 metros do canal existe uma terceira rampa com declive de 1:20 com tapetes porosos de forma a dissipar a energia de ondas e minimizar a reflexão destas.

Para as condições de ondas descritas em cima, e de forma a ajudar a ocorrência ou não de rebentação, foi ainda definida uma variável dimensional no canal,  $d$ , representada na figura 5.1 que toma os valores de 0.1m, para os casos com rebentação, e de 0.3m, para os casos sem rebentação.

Para cada ensaio foram posteriormente analisados os seguintes dados experimentais: a) valores da elevação da superfície da água ao longo do canal através da colocação de sondas espaçadas de 20cm, entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ ; b) valores da velocidade ao longo do canal através de um *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) colocado no centro da coluna de água entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=7\text{m}$  e espaçadas de 1m; c) perfis de velocidade medidos com intervalos de 5cm na direcção do eixo vertical nas secções seleccionadas em  $x=-10,-5,-2,-1,0,1,2$  e  $5\text{m}$ .

Os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais encontram-se representados na figura 5.2.



**Figura 5.2** - Vista lateral do canal de ondas (à esquerda), conjunto de 8 sondas de nível (primeira imagem ao centro), sondas de nível junto ao batedor (segunda imagem ao centro) e sondas de nível e ADV (à direita) [16].

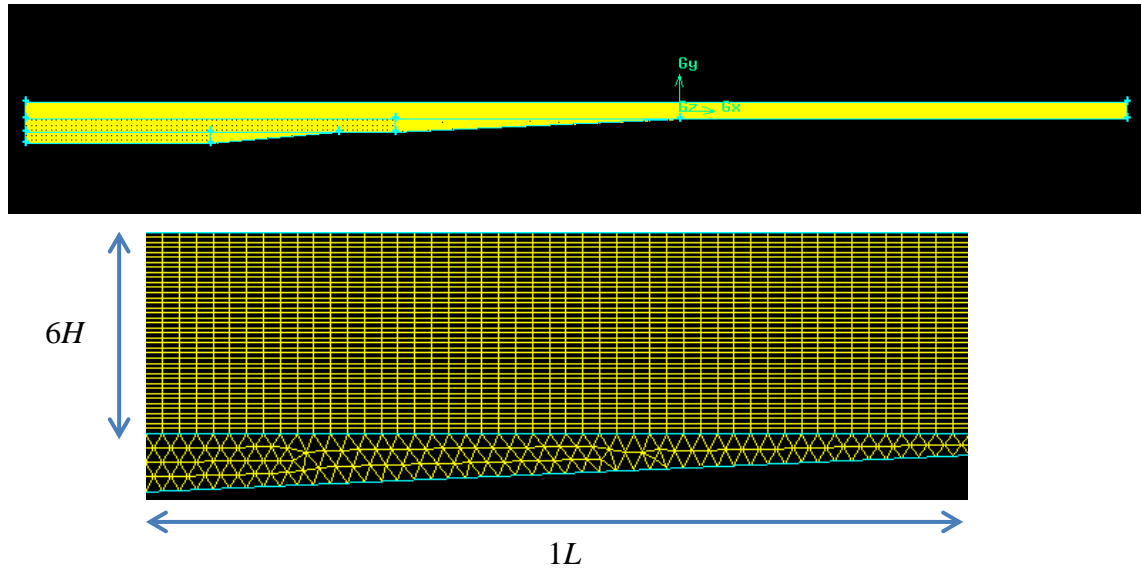
## 5.2 Caso bidimensional com fundo variável sem rebentação

Neste subcapítulo é descrito a simulação realizada para o caso de propagação de ondas regulares sem a ocorrência de rebentação baseado nos ensaios experimentais realizados por Conde *et al* [3] no LNEC.

### 5.2.1 Descrição da malha e esquemas numéricos

Apesar de ambos os casos, com e sem rebentação, terem sido realizados no mesmo canal, foi criada uma malha específica para cada um, de forma respeitar o mínimo de 10 elementos por altura de onda e 50 por comprimento de onda, uma vez que cada ensaio possui alturas e comprimentos de onda diferentes. Assim, para este caso específico, a

malha seguiu a geometria da secção do canal apresentado na figura 5.1, tendo apenas sido aumentado o comprimento na zona de geração de ondas até à posição de  $x=-23\text{m}$ , passando o canal numérico a possuir um comprimento útil de  $38.75\text{m}$ . Este aumento de comprimento foi efectuado de forma a ter-se a zona de relaxamento entre as posições  $x=-23\text{m}$  até  $x=-16.82\text{m}$ , posição onde se encontra o gerador de ondas no ensaio experimental, para que quando as ondas chegarem à posição do gerador venham já com as suas propriedades bem definidas e assim a zona de relaxamento não tenha influência nos resultados. Também as rampas de declive 1:20 e 1:2 foram retiradas do canal numérico, uma vez que a existência dessas rampas devia-se à dissipação da energia das ondas e essa dissipação no *Waves2Foam* é realizada através das zonas de relaxamento. A malha é então constituída por 210608 volumes de controlo, distribuídos de forma homogénea e a possuir os tais 10 elementos por altura de onda na direcção vertical e 50 elementos por comprimento de onda na direcção horizontal. Como se trata do caso sem rebentação, a variável dimensional,  $d$ , tem o valor de  $0.3\text{m}$ , tendo sido acrescentado ainda mais  $0.3\text{m}$  de altura correspondente à zona atmosférica. Na figura 5.3 pode se observar a malha gerada recorrendo a um programa de geração de malhas.



**Figura 5.3** - Malha utilizada na simulação para o caso bidimensional sem rebentação, em cima, e pormenor da malha em baixo.

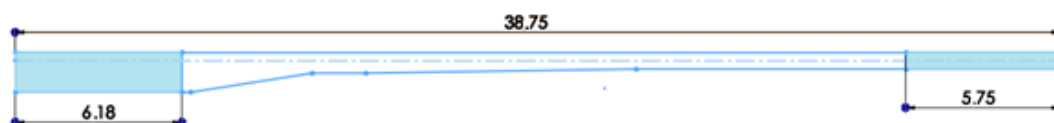
Os esquemas numéricos [15] e algoritmos de resolução [14] utilizados nesta simulação estão representados na tabela 5.1.

**Tabela 5.1 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução.**

Esquemas Numéricos	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes Discretização dos termos gradientes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos Laplacianos
Esquemas de Interpolação	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
Algoritmos de Resolução	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da velocidade Equação da fracção de volume

### 5.2.2 Condições de fronteira e iniciais do canal

Como condição fronteira, definiram-se duas zonas de relaxamento, de geração e dissipação de ondas, sendo a zona de geração colocada à entrada do canal, entre as posições  $x=-23\text{m}$  e  $x=-16.82\text{m}$  como referido em cima, com um comprimento de  $6.18\text{m}$ . A zona de dissipação está colocada entre a posição  $x=10\text{m}$  e  $x=15.75\text{m}$ , possuindo um comprimento de  $5.75\text{m}$ . Para o fundo do canal definiu-se a condição de velocidade nula. Para o termo da pressão, o gradiente é considerado nulo e para o topo considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A cota da superfície de água encontra-se em  $y=0$ , sendo que no instante  $t=0$ , a superfície encontra-se na horizontal, sem se verificar a propagação de ondas. Na figura 5.4 pode-se observar as zonas de relaxamento no canal numérico, destacadas a azul, e respectivos comprimentos, sendo que a linha a tracejado representa o nível da superfície livre.



**Figura 5.4 - Canal numérico com as zonas de relaxamento destacadas a azul, estando a zona de geração no início do canal e a zona de dissipação no fim deste.**

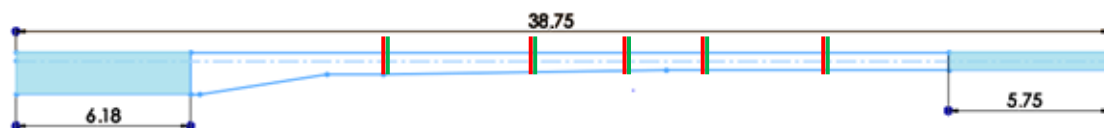
A onda gerada para esta simulação corresponde a uma onda regular de primeira ordem, correspondente à teoria de Airy, e possui as características apresentadas na tabela 5.2.

**Tabela 5.2 - Propriedades da onda gerada.**

Propriedades da onda regular de primeira ordem	
$D$ (na zona de geração)	1.15m
$T$	1.5s
$H$	0.1m
$L$	3.414m

### 5.2.3 Análise e comparação de resultados

Concluídas as simulações numéricas para este caso, os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais. O pós-processamento de dados no *OpenFoam* foi efectuado respeitando os mesmos critérios na análise de resultados experimentais. Foram então colocadas 100 sondas entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ , espaçadas de 20 cm, de forma a obter os valores da elevação da superfície livre ao longo do domínio e verificar a evolução temporal da elevação desta em diferentes posições do canal. Também para a velocidade foram colocadas sondas respeitando as posições definidas nos ensaios experimentais.



**Figura 5.5** - Representação das posições das sondas de elevação (vermelho) e de velocidade (verde) para as posições  $x=-10, -5, -2, 1$  e  $5\text{m}$ .

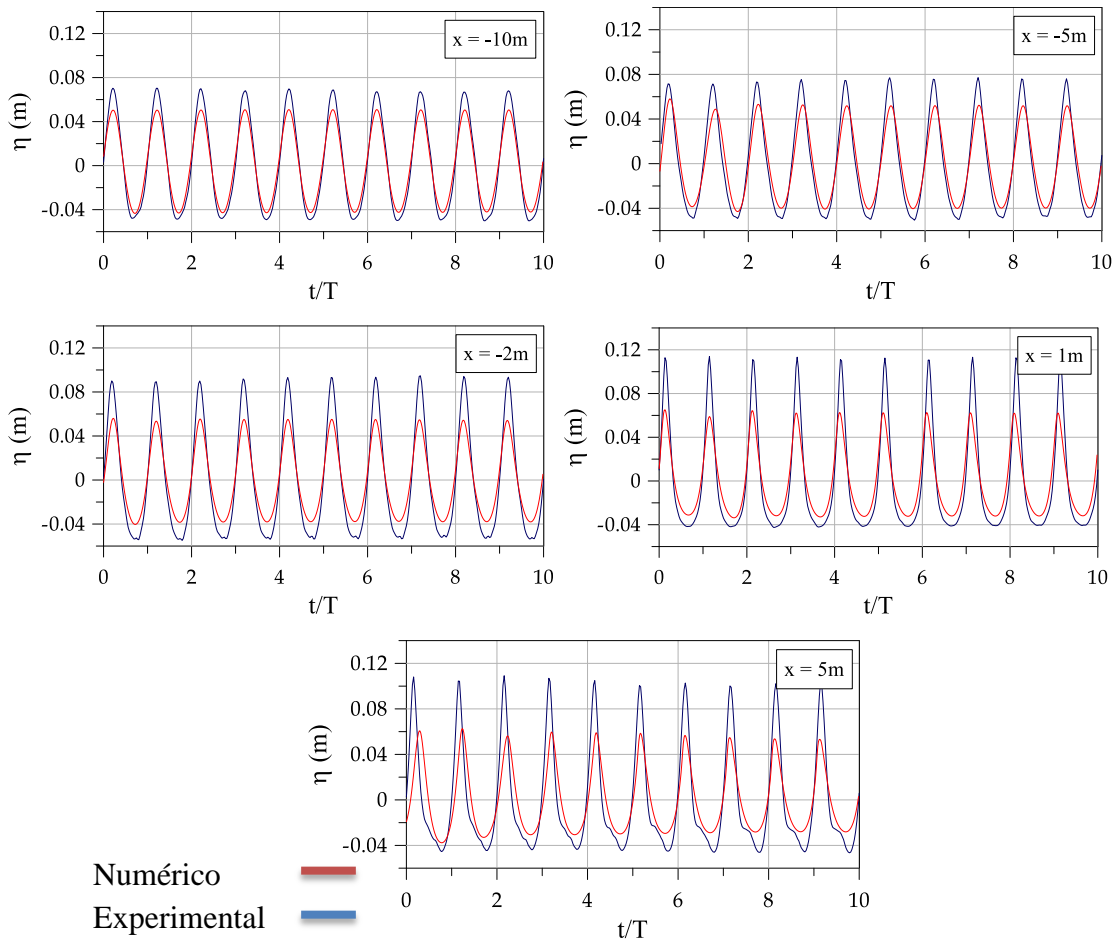
#### 5.2.3.1 Elevação da superfície livre

A análise da elevação da superfície livre teve o intuito de observar como se propaga a onda ao longo do canal para as condições iniciais definidas, i.e., observar como a onda se altera com a variação da profundidade. Na figura 5.6 estão representados os



resultados obtidos para a elevação da superfície para as posições  $x=-10,-5,-2,1$  e  $5\text{m}$ , registadas por sondas para ondas incidentes regulares com o período de  $1.5\text{s}$  e altura de  $0.1\text{m}$  durante 10 períodos, sobrepostos aos resultados obtidos experimentalmente para as mesmas posições.

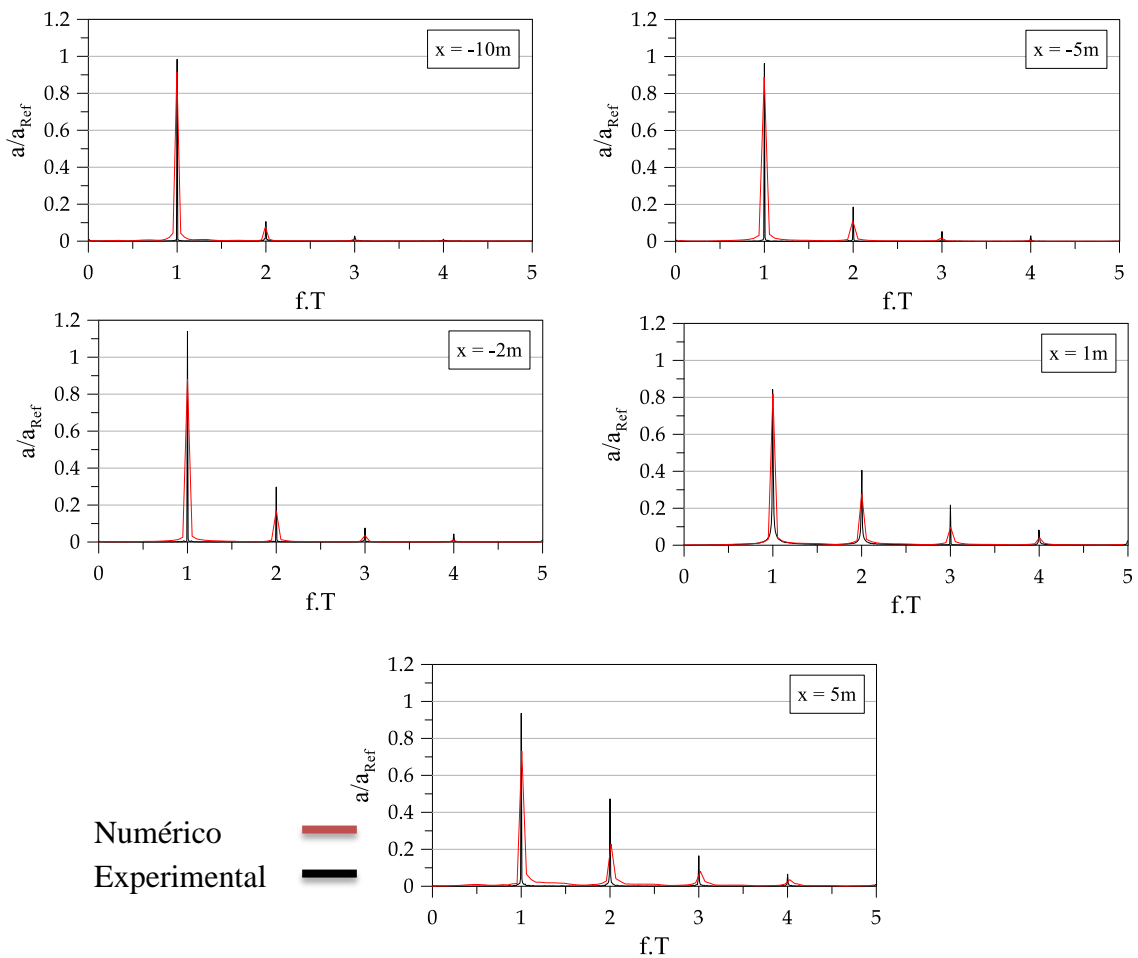
Pode-se observar que na propagação de ondas na simulação numérica, linha a vermelho nos gráficos, não ocorre variação da amplitude na crista da onda, permanecendo nos  $0.05\text{m}$  em todas as posições. Fazendo uma comparação de resultados, verifica-se um aumento de altura da crista da onda no caso do ensaio experimental, à medida que a onda se propaga no canal, devido à redução de área da secção transversal referida na descrição dos ensaios experimentais e do efeito da redução da profundidade. Este aumento de amplitude na crista da onda já não se observa na simulação numérica devido ao facto de se tratar num caso bidimensional, como tal não possui essa redução de área da secção transversal.



**Figura 5.6** - Elevação da superfície livre,  $\eta$ , para uma onda de período  $1.5\text{s}$  e altura de onda de  $0.10\text{m}$  para as diferentes posições ao longo no canal.

Na figura 5.7 pode-se ver a análise espectral de amplitudes para a onda simulada em diferentes posições do canal e na tabela 5.3 os respectivos valores. No gráfico a

vermelho está representado a análise espectral para este ensaio e a preto para o ensaio experimental. Em ambos os casos, a análise espectral da amplitude foi efectuada utilizando a transformada discreta de Fourier (DFT), sendo que a amplitude de referência para o caso experimental,  $A_{ref}$ , foi metade do valor da altura significativa para a sonda posicionada em  $x=-10.8\text{m}$ , com  $H_{sref}=0.119\text{m}$ . Para esta simulação, a amplitude de referência foi de  $0.05\text{m}$ , correspondente a metade da altura definida para a onda. Verifica-se que, em ambos os casos, à medida que a profundidade do canal diminui, a amplitude das harmónicas aumenta e torna-se cada vez mais importante. Este aumento de amplitude das harmónicas deve-se principalmente ao efeito da profundidade na propagação das ondas.



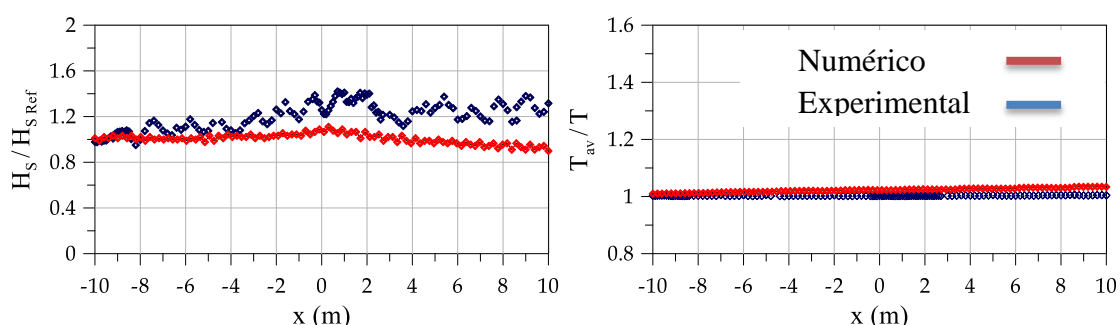
**Figura 5.7** - Espectros de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T=1.5\text{s}$  e  $H=0.1\text{m}$ .

**Tabela 5.3 - Valores obtidos nos espectros de amplitude.**

	Caso Numérico				Caso Experimental				
$f.T$	1	2	3	4	1	2	3	4	$x(m)$
$A/A_{ref}$	0.915	0.0776	0.0101	0.002	0.984	0.106	0.0279	0.0107	-10
	0.888	0.11	0.0176	0.0034	0.962	0.185	0.053	0.0298	-5
	0.881	0.169	0.0358	0.009	1.14	0.297	0.0757	0.0436	-2
	0.818	0.278	0.0974	0.04	0.84	0.405	0.217	0.0818	1
	0.731	0.227	0.08	0.0357	0.936	0.472	0.165	0.0653	5

Por fim, na figura 5.8 está representada a evolução da altura significativa,  $H_S$ , e período médio,  $T_{av}$ , para a onda simulada ao longo do canal, tanto para o caso experimental como para o caso numérico. Através da figura, verifica-se que, ao contrário do que acontece no caso experimental, a altura significativa para o caso numérico praticamente não aumenta ao longo do canal. Isto deve-se mais uma vez ao facto de se tratar de um caso bidimensional sem a diminuição de área transversal que provoca o aumento da altura de onda. É visível também que a partir da posição  $x=2m$  a altura significativa no caso numérico tem um ligeiro decaimento, isto pode dever a alguma dissipação de energia por um mau refinamento ou a um passo de tempo elevado para a simulação.

Para o período médio, verifica-se que no caso experimental este permanece constante, enquanto no caso numérico denota-se um ligeiro aumento ao longo do canal.



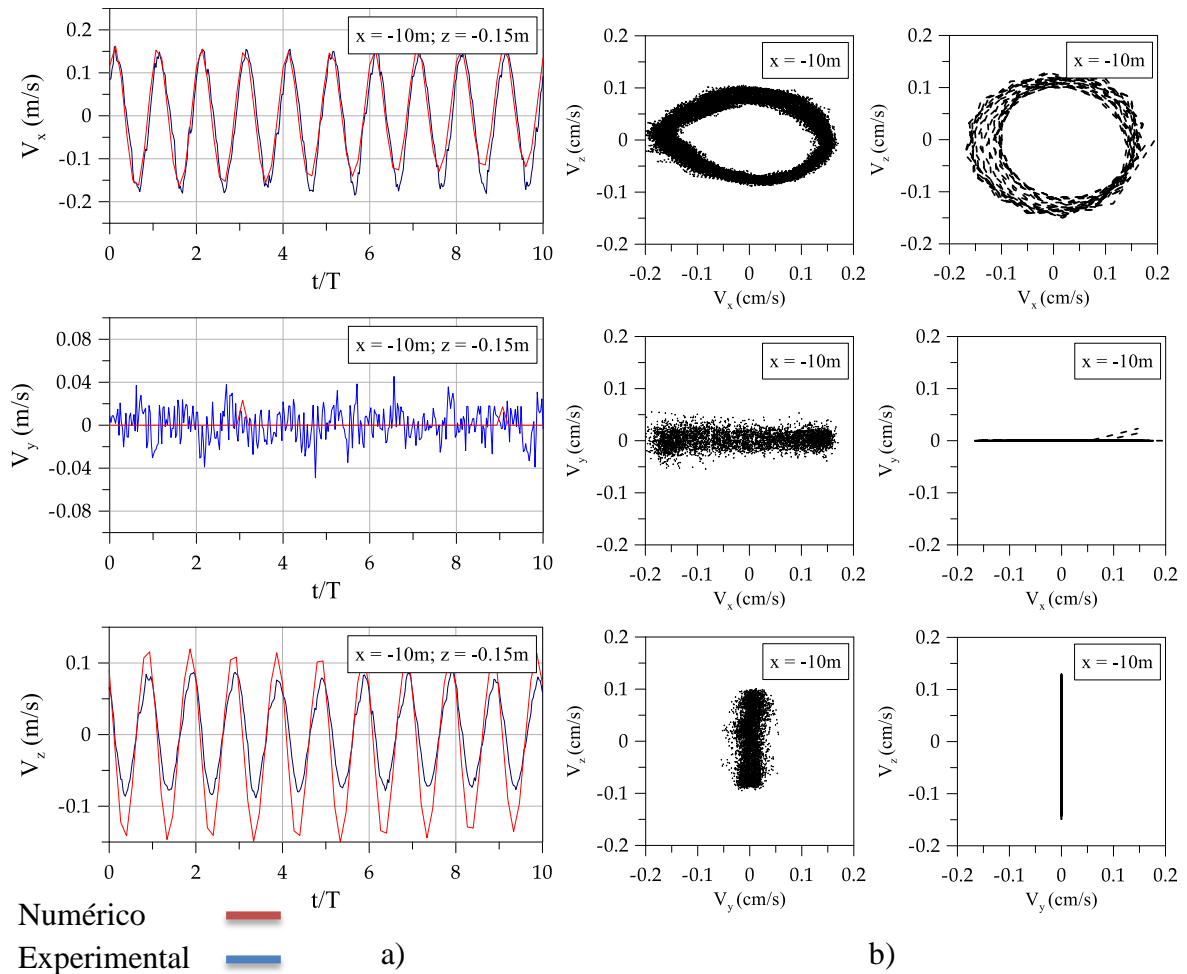
**Figura 5.8 - Altura significativa,  $H_S$ , e período médio,  $T_{av}$ , ao longo do domínio.**

### 5.2.3.2 Análise de velocidades

Foram também analisadas as velocidades das partículas do fluido para a posição  $x = -10$ ,  $y = 0$  e  $z = -0.15\text{m}$ . Na figura 5.9(a) está representada a comparação da evolução das 3 componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos, entre o caso experimental (a azul) e o caso numérico (a vermelho).

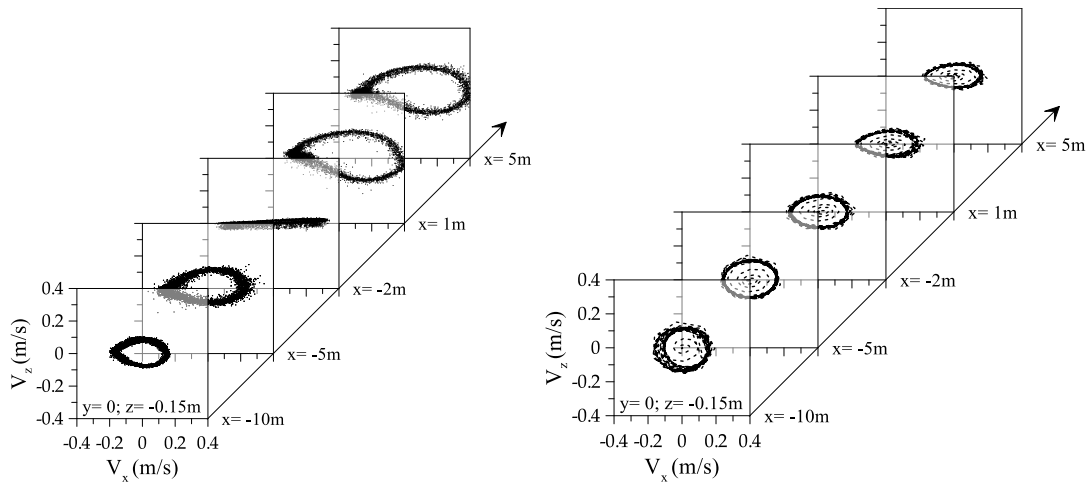
Observa-se que para a componente  $V_x$  os resultados obtidos nesta simulação são bastante idênticos ao caso experimental, para a componente  $V_y$  a velocidade é nula no caso numérico, pois trata-se de um caso bidimensional, e para a componente  $V_z$ , verifica-se que no caso numérico a velocidade toma uma amplitude de valores ligeiramente superiores ao caso experimental, tomando valores idênticos à componente  $V_x$ . Isto deve-se ao facto de ser um caso bidimensional sem a redução de área da secção transversal que provoca um aumento da altura de onda no caso experimental. Este aumento da altura da onda faz com que a profundidade comece a ter alguma influência na propagação da onda e por isso as partículas do fluido ficam com uma trajectória elíptica, como mostra a figura 5.9(b).

Na figura 5.9(b) faz-se então uma comparação da análise bidimensional da distribuição das componentes da velocidade nos planos  $xy$ ,  $xz$  e  $yz$ . É então visível que, para o plano  $xz$ , no caso experimental, as partículas da velocidade possuem uma órbita elíptica, enquanto para esta simulação a órbita é circular, pois as componentes  $V_x$  e  $V_z$  tomam valores semelhantes ao longo do tempo. Para os planos  $xy$  e  $yz$ , observa-se uma trajectória linear em ambos os casos, pois para o caso experimental a componente  $V_y$  toma valores próximos do 0 e no caso numérico a componente  $V_y$  é nula por se tratar de um caso bidimensional.



**Figura 5.9** - a) Evolução das componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos, para a posição  $x=10$ ,  $y=0$  e  $z=-0.15\text{m}$ . b) Distribuição bidimensional das componentes da velocidade nos planos  $xy$ ,  $xz$  e  $yz$  para a mesma posição, no lado esquerdo para o caso experimental e no lado direito para o caso numérico.

Na figura 5.10 encontra-se representada a distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano  $xz$  para diferentes posições ao longo do canal de ondas. A comparação entre os casos experimental e numérico permite verificar que no experimental as orbitas elípticas das partículas vão aumentando de dimensão ao longo do canal. Tal é uma consequência directa da diminuição da profundidade. Já para a simulação numérica, verifica-se que para a posição de  $x=-10\text{m}$  as partículas possuem orbitas circulares, mas estas orbitas vão se tornando elípticas e mais alongadas, tal como no caso experimental, à medida que a profundidade diminui ao longo do domínio, por efeito da redução da profundidade.



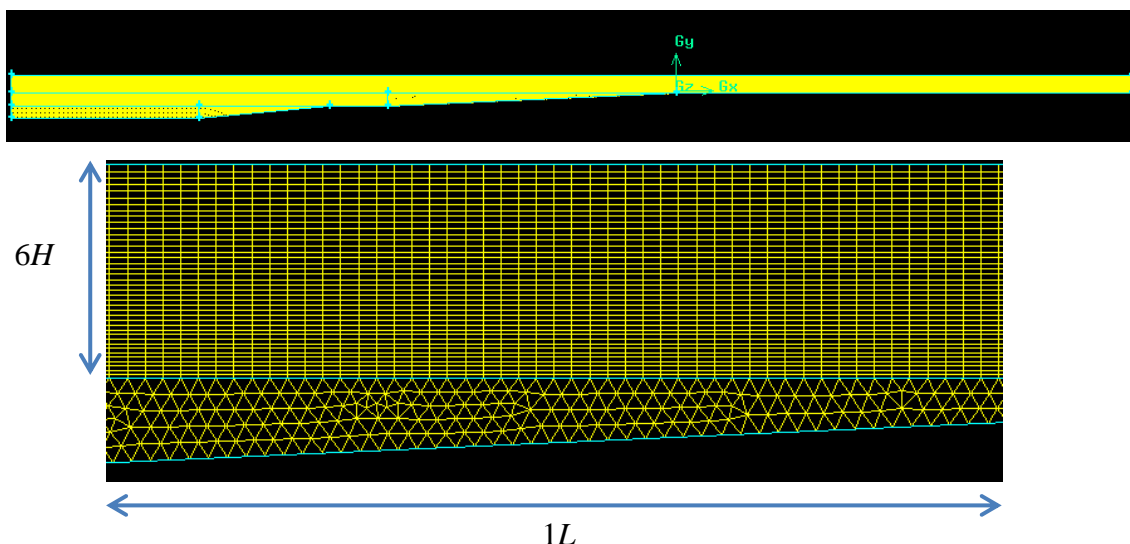
**Figura 5.10** - Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano  $xz$  do canal para o caso experimental (à esquerda) e caso numérico (à direita), para as posições  $x=-10, -5, -2, 1$  e  $5$ ,  $y=0$  e  $z=-0.15$ m.

### 5.3 Caso bidimensional de fundo variável com rebentação

Neste subcapítulo é descrita a simulação realizada para o caso de propagação de ondas regulares com a ocorrência de rebentação baseada nos ensaios experimentais de Endres *et al* [4] no LNEC.

#### 5.3.1 Descrição da malha e esquemas numéricos

Tal como no caso anterior a malha seguiu a geometria da secção do canal apresentado na figura 5.1, tendo apenas sido aumentado o comprimento na zona de geração de ondas até à posição de  $x=-23$ m, passando o canal numérico a possuir um comprimento útil de 38.75m. Também as rampas de declive 1:20 e 1:2 que serviam para a dissipação da energia das ondas, foram substituídas por uma zona de relaxamento. A malha é então constituída por 148588 volumes de controlo, distribuídos de forma homogénea e a possuir os 10 elementos por altura de onda na direcção vertical e 50 elementos por comprimento de onda na direcção horizontal. Como se trata do caso com rebentação, a variável dimensional,  $d$ , tem o valor de 0.1m, tendo sido acrescentado ainda mais 0.5m de altura correspondente à zona atmosférica. Na figura 5.11 observa-se a malha gerada para este caso.



**Figura 5.11** - Malha utilizada para esta simulação em cima e pormenor da malha em baixo.

Os esquemas numéricos [15] e algoritmos de resolução [14] utilizados nesta simulação estão representados na tabela 5.4.

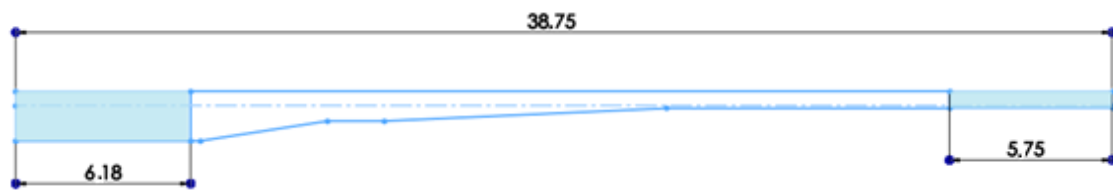
**Tabela 5.4 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução.**

Esquemas Numéricos	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes Discretização dos termos gradientes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos Laplacianos
Esquemas de Interpolação	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
Algoritmos de Resolução	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da velocidade Equação da fracção de volume

### 5.3.2 Condições de fronteira e iniciais do canal

Para condição fronteira à entrada do canal foi definida uma zona de relaxamento de geração de ondas, entre as posições  $x=-23\text{m}$  e  $x=-16.82\text{m}$ , com um comprimento de

6.18m. À saída do canal está colocada uma zona de dissipação de energia de ondas entre a posição  $x=10\text{m}$  e  $x=15.75\text{m}$ , possuindo um comprimento de 5.75m. Como condição fronteira para o fundo do canal definiu-se a condição de velocidade nula. Para o termo da pressão, o gradiente é considerado nulo e para o topo considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A superfície livre encontra-se em  $y=0$ , sendo que no instante  $t=0$ , a superfície encontra-se na horizontal, sem se verificar a propagação de ondas. Na figura 5.12 pode-se observar as zonas de relaxamento no canal numérico, destacadas a azul, e respectivos comprimentos, sendo que a linha a tracejado representa o nível da superfície livre.



**Figura 5.12** - Canal numérico com as zonas de relaxamento destacadas a azul, estando a zona de geração no início do canal e a zona de dissipação no fim deste.

A onda gerada para esta simulação corresponde a uma onda regular de primeira ordem, correspondente à teoria de Airy, e possui as características apresentadas na tabela 5.5.

**Tabela 5.5** - Características da onda gerada para o caso bidimensional com rebentação.

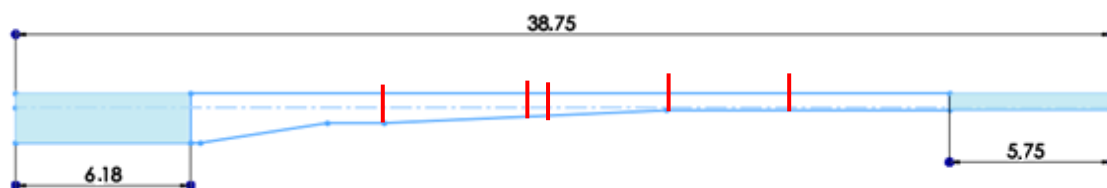
Propriedades da onda regular de primeira ordem	
$D$ (na zona de geração)	0.95m
$T$	1.5s
$H$	0.18m
$L$	3.326m

### 5.3.3 Análise e comparação de resultados

Os resultados obtidos nesta simulação numérica foram posteriormente comparados com os resultados experimentais. O pós-processamento de dados no *OpenFoam* foi efectuado respeitando os mesmos critérios na análise de resultados experimentais. Foram então colocadas 100 sondas entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ , espaçadas de



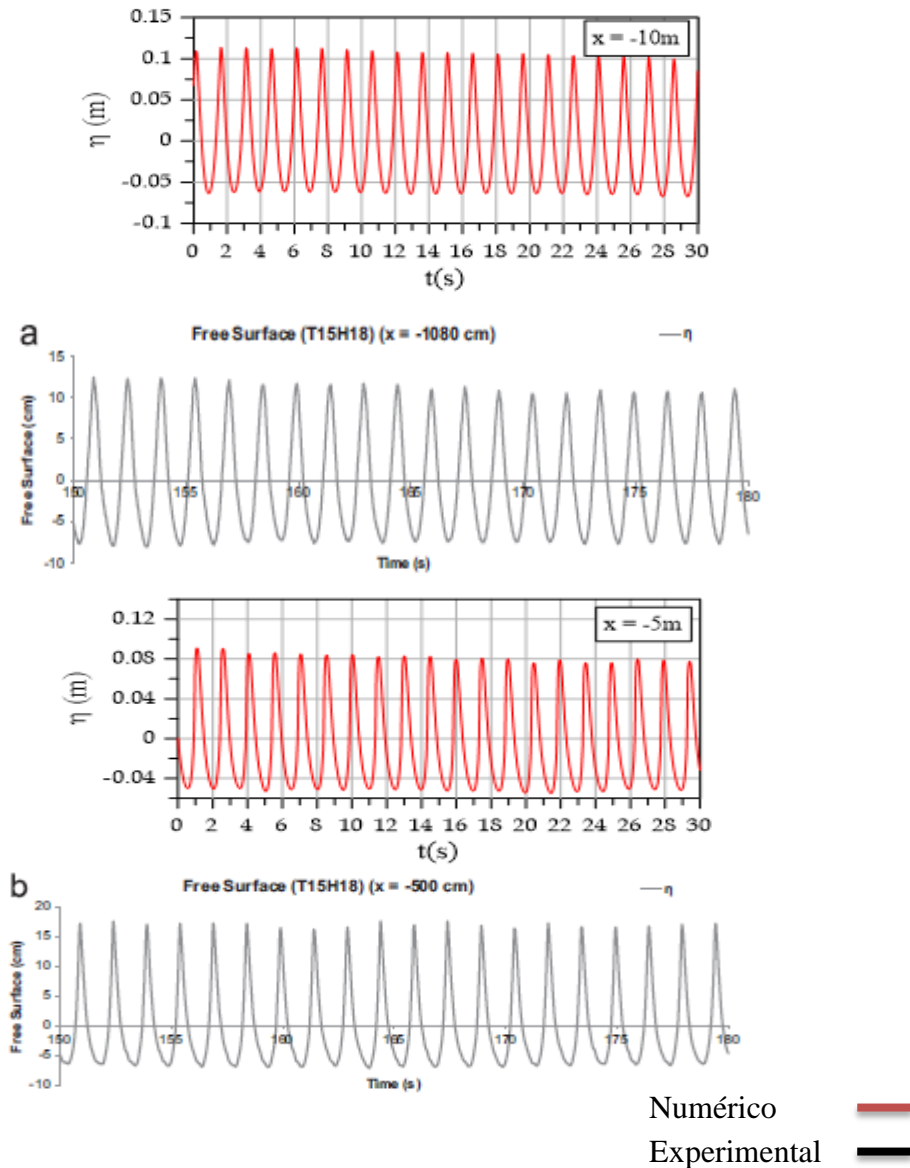
20cm, de forma a retirar os valores da elevação da superfície livre ao longo do domínio e verificar a evolução temporal desta em diferentes posições do canal.



**Figura 5.13** - Representação das posições das sondas de elevação para as posições  $x=-10,-5-4,0$  e  $4m$ .

### 5.3.3.1 Elevação da superfície livre

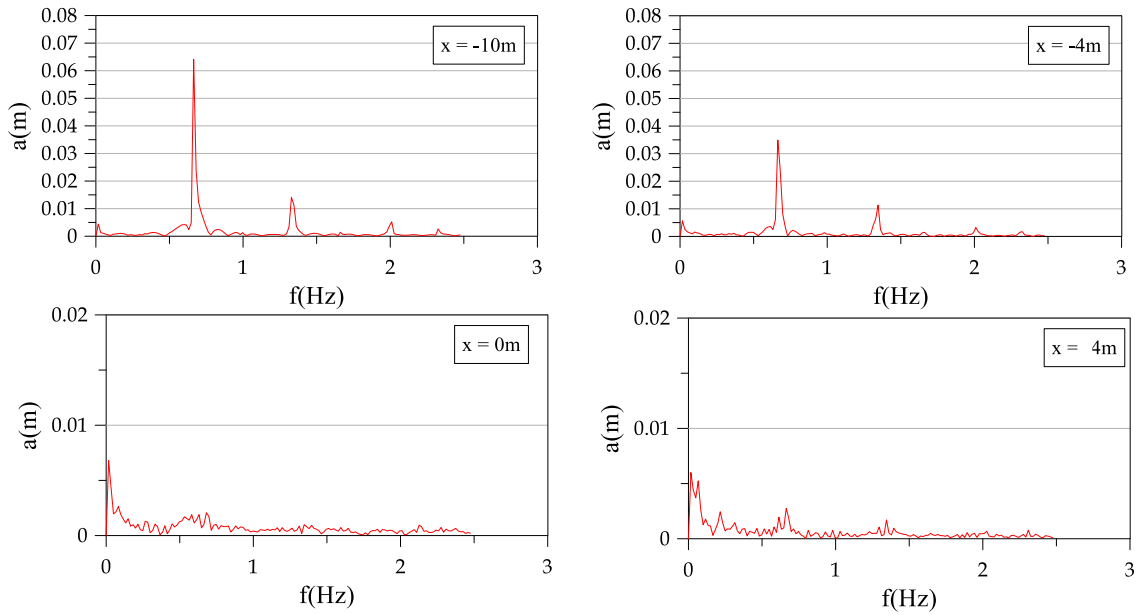
A análise da elevação da superfície livre teve o intuito de observar como se propaga a onda ao longo do canal para as condições iniciais definidas, i.e., observar como a onda se altera com a variação da profundidade e em que condição se dá a sua rebentação. Na figura 5.14 estão representados os resultados obtidos para a elevação da superfície para as posições  $x=-10.8$  e  $-5m$ , onde a onda ainda se propaga sem perturbações, registadas por sondas para ondas incidentes regulares com o período de  $1.5s$  e altura de  $0.18m$  durante  $30s$ , em comparação com os resultados obtidos experimentalmente para as mesmas posições. A comparação de resultados permite verificar um aumento de altura da crista da onda no caso do ensaio experimental, entre as posições  $x=-10.8$  e  $-5m$ , devido à redução de área da secção transversal referida na descrição dos ensaios experimentais. Este aumento de amplitude na crista da onda já não se observa na simulação numérica devido ao facto de se tratar num caso bidimensional e como tal não possui essa redução de área da secção transversal.



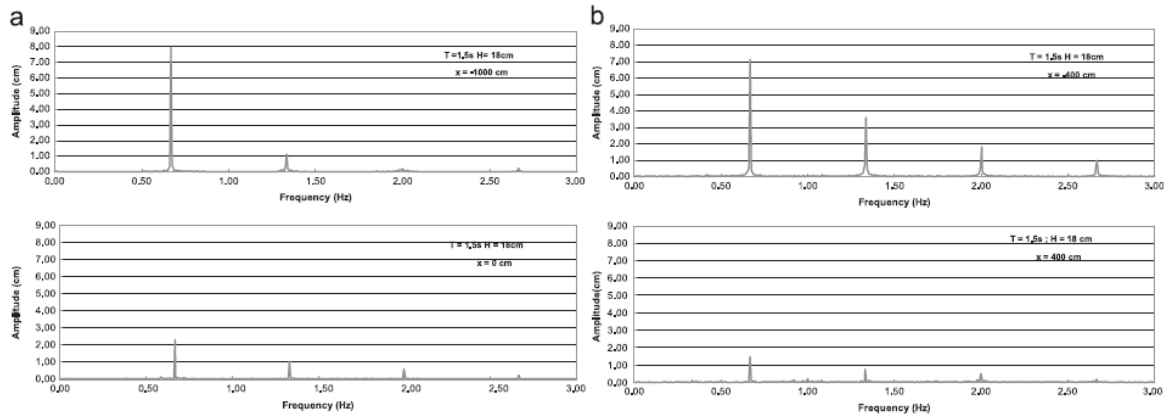
**Figura 5.14** - Elevação da superfície livre,  $\eta$ , para uma onda de período 1.5s e altura de onda de 0.18m para as posições  $x=-10.8$ m e  $x=-5$ m [4].

Nas figuras 5.15 e 5.16 apresentam-se os espectros de amplitude para a onda simulada nas posições  $x=-10, -4, 0$  e  $4$ m do canal. Em ambos os casos, a análise espectral da amplitude foi efectuada utilizando a transformada discreta de Fourier (DFT). Fazendo uma comparação entre os gráficos verifica-se que para a posição  $x=-10$ m os picos dos espectros de amplitudes são semelhantes entre o caso numérico e experimental pois ainda não existe a ocorrência da rebentação. Ao contrário do que acontece no caso experimental, no caso numérico não se verifica um aumento de amplitude das harmónicas com a propagação da onda ao longo do canal. Após a rebentação, no caso experimental a amplitude da frequência principal decresce muito enquanto no caso numérico torna-se impossível distinguir a frequência principal das

harmônicas. Isto acontece devido à não utilização de modelos de turbulência na simulação.



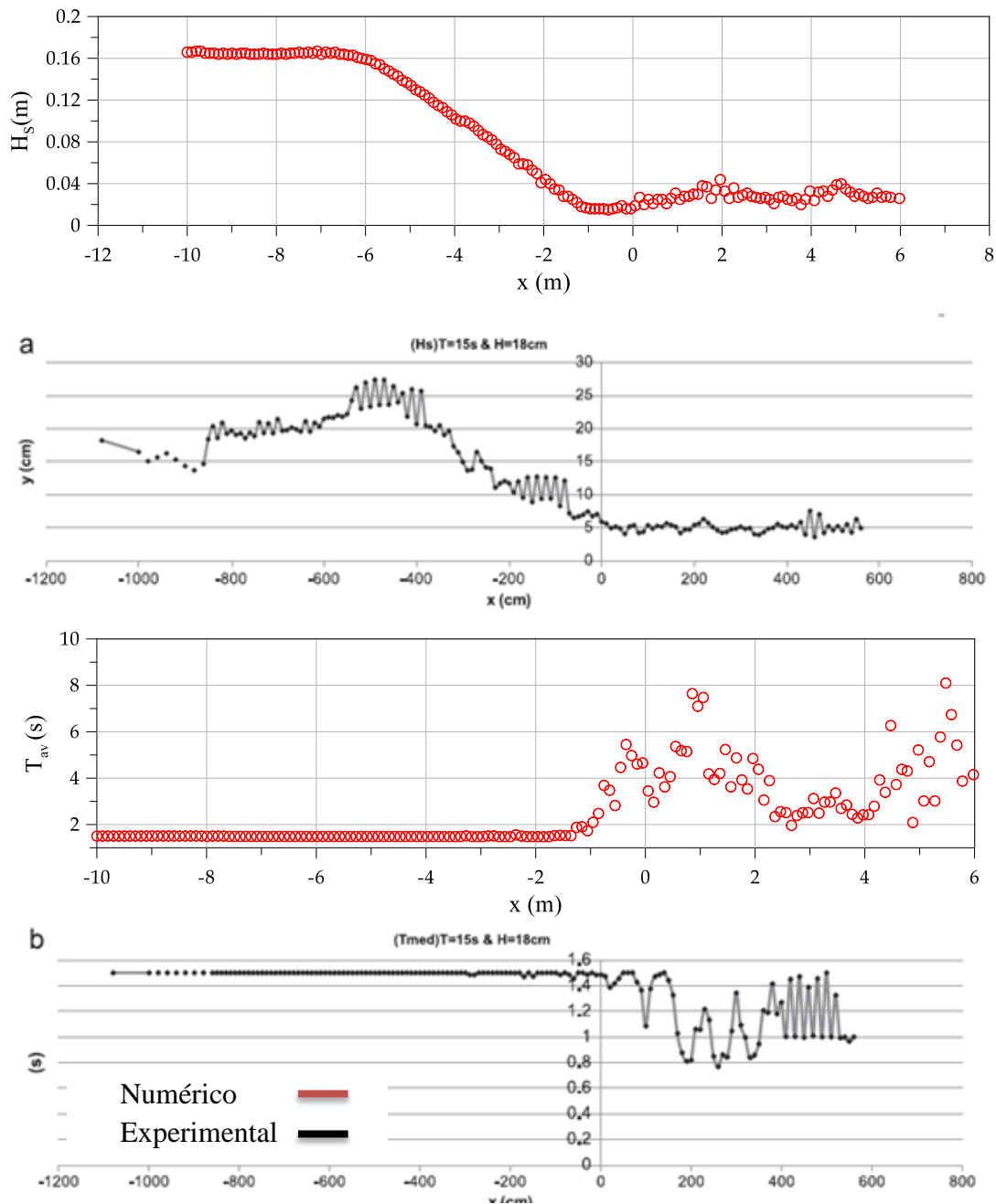
**Figura 5.15** - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T=1.5s$  e  $H=0.18m$  para caso numérico.



**Figura 5.16** - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T=1.5s$  e  $H=0.18m$  para caso experimental [4].

Por fim, na figura 5.17 está representado a evolução da altura significativa,  $H_s$ , e período médio,  $T_{av}$ , para a onda simulada ao longo do canal, tanto para o caso experimental como para o caso numérico. Analisando a altura significativa para o caso numérico é visível que a onda se propaga até à posição  $x=-6m$  com altura de onda constante. A partir dessa posição, a altura começa a diminuir até  $x=-2m$  onde se dá a rebentação. O período médio permanece constante em 1.5s até à posição da rebentação, sendo que depois começa a dispersar devido à não utilização de modelos de turbulência nesta simulação. A comparação dos resultados, do caso numérico com o caso

experimental, permite verificar que para o caso experimental ocorre um aumento da altura significativa à medida que a onda se propaga ao longo do canal, atingindo um pico de 0.25m, devido à redução da área da secção transversal. Após a ocorrência da rebentação, a altura da onda cai drasticamente. Esse aumento na altura de onda não se verifica no caso numérico uma vez que se trata de um caso bidimensional. No período médio, observa-se que até à posição  $x=-1\text{m}$  estes permanecem constantes em ambos os casos em 1.5s, sendo que após a rebentação são visíveis umas oscilações no caso experimental e uma dispersão do período médio no caso numérico.



**Figura 5.17** - Altura significativa,  $H_s$ , e período médio,  $T_{av}$ , para o caso experimental [4] e numérico ao longo do domínio.

# 6º Capítulo

## Propagação de ondas num canal tridimensional de fundo variável

Neste capítulo descreve-se a simulação de quatro casos de propagação de ondas num canal tridimensional de fundo variável, realizado com o intuito de observar o efeito da profundidade na propagação de ondas. Este efeito que a profundidade tem na propagação de ondas e as características da transformação e rebentação destas são muito importantes para os estudos hidrodinâmicos e projecto de estruturas costeiras. Trata-se de dois casos de propagação de ondas regulares e outros dois de propagação de ondas bicromáticas, com e sem ocorrência de rebentação.

Os casos de ondas regulares são baseados em ensaios experimentais efectuados por Conde *et al* [3], no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), onde foram geradas ondas regulares, num canal com um fundo variável, sem a ocorrência de rebentação e nos ensaios efectuados por Endres *et al* [4], também no LNEC, onde foram geradas ondas regulares no mesmo canal com rebentação. Estes casos servem também para a validação da ferramenta *Waves2Foam*, para a propagação de ondas regulares em simulações tridimensionais, através da comparação dos resultados com os dados experimentais.

Os casos de ondas bicromáticas são baseados em ensaios experimentais efectuados por Conde *et al* [5], também efectuados no LNEC, onde foram geradas ondas bicromáticas, num canal com um fundo variável, em condições com rebentação e sem rebentação. Este caso serve também para a validação da ferramenta *Waves2Foam* para o estudo de propagação de ondas bicromáticas, através da comparação dos resultados com os dados experimentais.

### 6.1 Descrição dos ensaios experimentais

Neste subcapítulo são descritos o conjunto de ensaios experimentais realizados no LNEC. Os ensaios experimentais de propagação de ondas regulares num canal de

profundidade variável efectuado por Conde *et al* [3] e Endres *et al* [4] são os mesmos que foram descritos no capítulo 5. Para a situação sem ocorrência de rebentação as ondas geradas possuíam um período de 1.5s, altura de onda de 0.1m e profundidade na zona de geração de 1.15m. Na situação com rebentação o período é idêntico ao caso anterior, sendo neste caso a altura de onda de 0.18m e a profundidade na zona de geração de 0.95m.

O canal e o modo de processamento de dados utilizado no ensaio experimental para o caso de propagação de ondas bicromáticas efectuado por Conde *et al* [5] foi o mesmo utilizado no caso de ondas regulares no capítulo 5. Para a situação sem ocorrência de rebentação as ondas geradas possuíam períodos de 1.5s e 1.1s, altura de onda de 0.08m e profundidade na zona de geração de 1.15m. Na situação com rebentação os períodos são idênticos ao caso anterior, sendo neste caso a altura de onda de 0.05m e a profundidade na zona de geração de 0.95m.

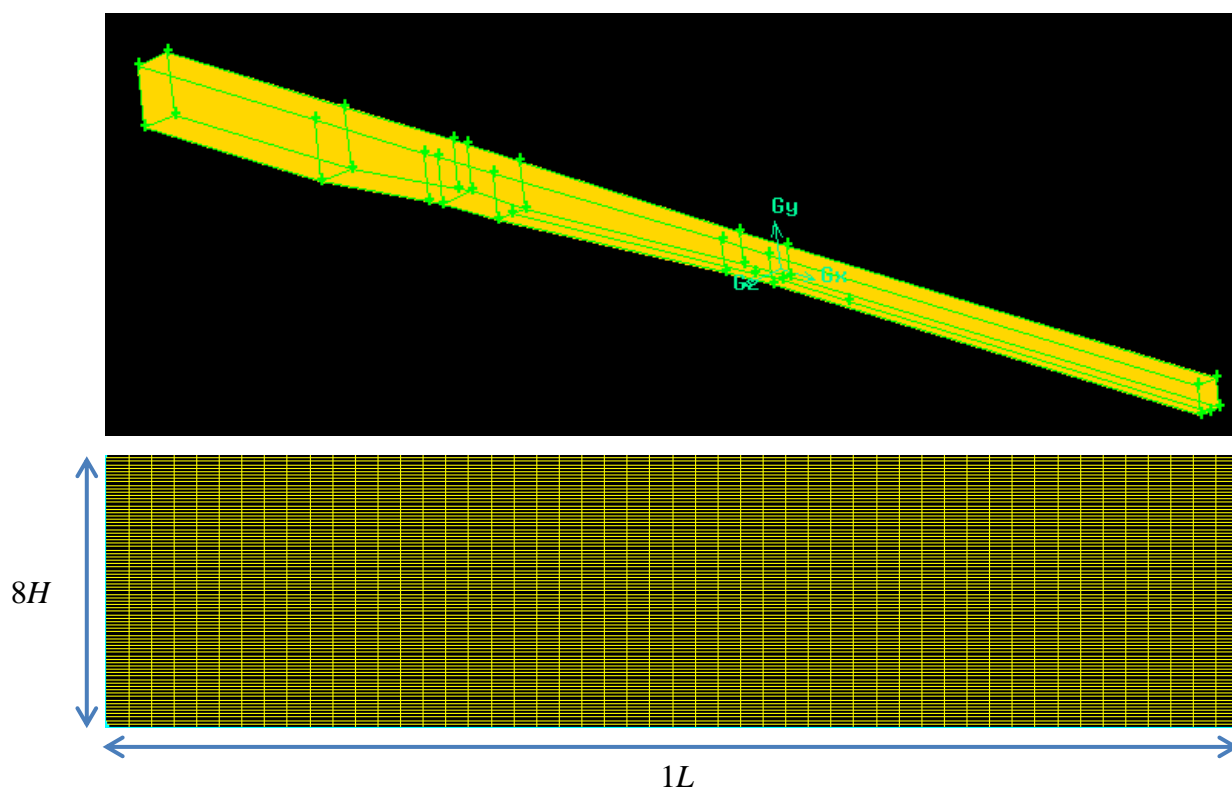
## **6.2 Caso de propagação de ondas regulares sem rebentação num canal 3D de profundidade variável**

Neste subcapítulo é descrita a simulação realizada para o caso de propagação de ondas regulares sem a ocorrência de rebentação para um canal tridimensional.

### **6.2.1 Descrição da malha e esquemas numéricos**

Tal como no caso bidimensional apresentado no capítulo 5, foi criada uma malha específica para cada um dos casos, de forma respeitar o mínimo de 10 elementos por altura de onda e 50 por comprimento de onda, uma vez que cada ensaio tinha alturas e comprimentos de onda diferentes. Assim, para este caso específico, a malha seguiu a mesma geometria do canal apresentado na figura 5.1, tendo sido apenas aumentado o comprimento na zona de geração de ondas até à posição de  $x=-23\text{m}$ , passando o canal numérico a possuir um comprimento útil de 38.75m. Este aumento de comprimento foi efectuado de forma a ter-se a zona de relaxamento entre as posições  $x=-23\text{m}$  até  $x=-16.82\text{m}$ , posição onde se encontra o gerador de ondas no ensaio experimental, para que as ondas que chegam à posição do gerador venham já com as suas propriedades

bem definidas e assim a zona de relaxamento não tenha influência nos resultados. Também as rampas de declive 1:20 e 1:2 foram retiradas do canal numérico, uma vez a existência dessas rampas devia-se à dissipação da energia das ondas e essa dissipação no *Waves2Foam* é realizada através das zonas de relaxamento. A malha é então constituída por 322040 volumes de controlo, distribuídos de forma homogénea e a possuir 10 elementos por altura de onda na direcção vertical e 50 elementos por comprimento de onda na direcção horizontal. Como se trata do caso sem rebentação, a variável dimensional,  $d$ , tem o valor de 0.3m, tendo sido acrescentado ainda mais 0.5m correspondentes a uma zona de ar. Na figura 6.1 pode-se observar a malha gerada para esta simulação.



**Figura 6.1** - Malha 3D utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor dos elementos da malha lateral entre as posições  $x=5$  e  $x=8.3414$ m, em baixo.

Para esta simulação foram utilizados os esquemas numéricos e algoritmos de resolução indicados na tabela 6.1.

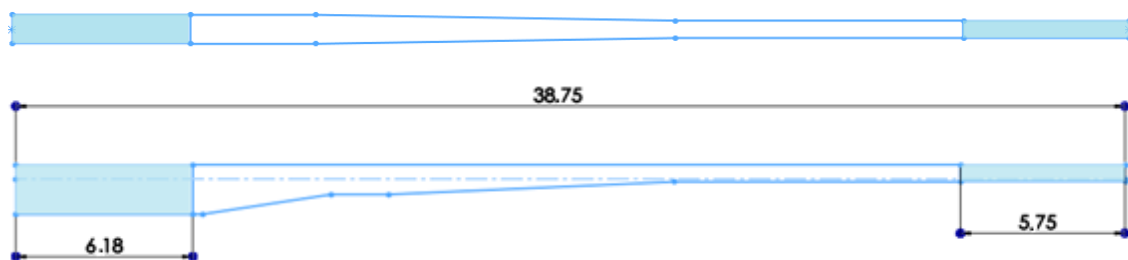
***Tabela 6.1 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas regulares sem rebentação.***

<b>Esquemas Numéricos</b>	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes Discretização dos termos gradientes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos Laplacianos
<b>Esquemas de Interpolação</b>	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
<b>Algoritmos de Resolução</b>	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da velocidade Equação da fracção de volume

### **6.2.2 Condições de fronteira e iniciais do canal**

Como condição fronteira, definiram-se duas zonas de relaxamento, de geração e dissipação de ondas, sendo a zona de geração colocada à entrada do canal, entre as posições  $x=-23\text{m}$  e  $x=-16.82\text{m}$  como referido em cima, com um comprimento de  $6.18\text{m}$ . A zona de dissipação está colocada entre a posição  $x=10\text{m}$  e  $x=15.75\text{m}$ , possuindo um comprimento de  $5.75\text{m}$ . Para o fundo do canal e para as paredes laterais definiu-se a condição de velocidade nula. Para o termo da pressão, o gradiente é considerado nulo e para o topo considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A cota da superfície de água encontra-se em  $y=0$ , sendo que no instante  $t=0$ , a superfície encontra-se na horizontal, sem se verificar a propagação de ondas. Na figura 6.2 está representado o canal com as zonas de relaxamento destacadas.





**Figura 6.2** - Representação das zonas de relaxamento, destacadas em azul, no canal numérico.

A onda gerada para esta simulação corresponde a uma onda regular de primeira ordem, correspondente à teoria de Airy, e possui as características apresentadas na tabela 6.2.

**Tabela 6.2** - Características da onda regular para o caso 3D sem rebentação.

Propriedades da onda regular de primeira ordem	
$D$ (na zona de geração)	1.15m
$T$	1.5s
$H$	0.1m
$L$	3.414m

### 6.2.3 Análise e comparação de resultados

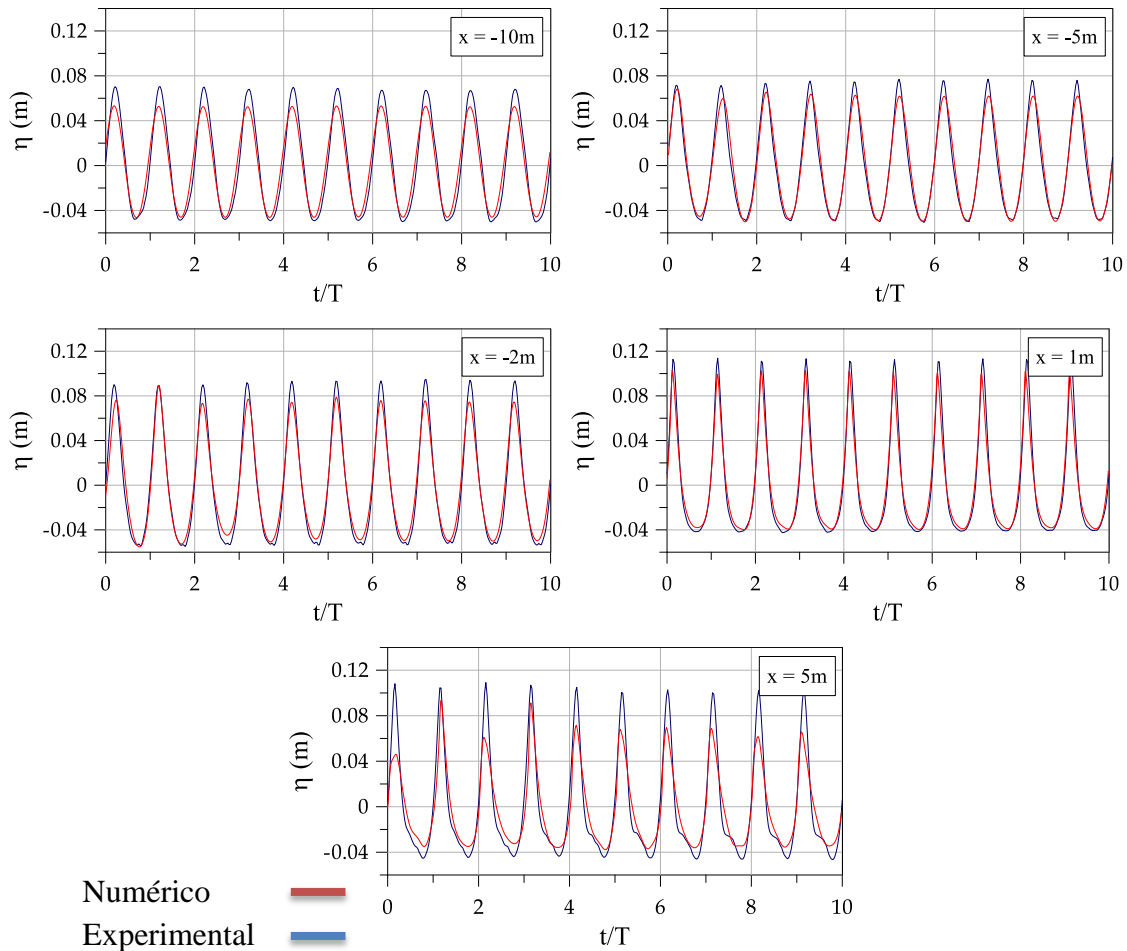
Os resultados obtidos nesta simulação numérica foram comparados com os resultados experimentais. O pós-processamento de dados no *OpenFoam* foi efectuado respeitando os mesmos critérios na análise dos resultados experimentais. Ao longo do domínio foram colocadas 100 sondas entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ , espaçadas de 20 cm, de forma a retirar os valores da elevação da superfície livre e verificar a evolução temporal desta em diferentes posições do canal. Também para a velocidade foram colocadas sondas respeitando as posições definidas nos ensaios experimentais.

#### 6.2.3.1 Elevação da superfície livre

A análise da elevação da superfície livre teve o intuito de observar como se propaga a onda ao longo do canal para as condições iniciais definidas, i.e., observar como a onda

se altera com a variação da profundidade. Na figura 6.3 estão representados os resultados obtidos para a elevação da superfície para as posições  $x=-10,-5,-2,1$  e  $5\text{m}$ , registadas por sondas para ondas incidentes regulares com o período de  $1.5\text{s}$  e altura de  $0.1\text{m}$  durante 10 períodos, sobrepostos aos resultados obtidos experimentalmente para as mesmas posições.

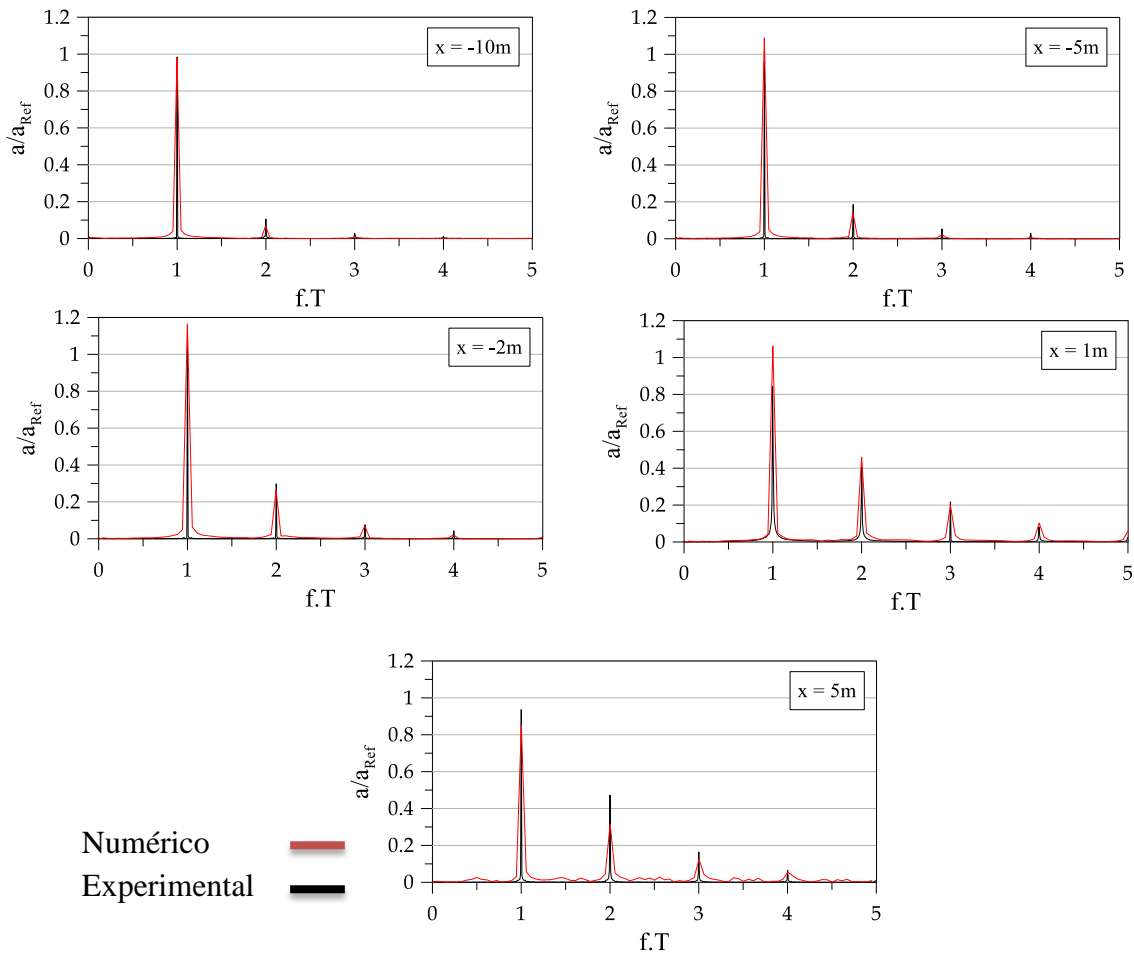
A comparação de resultados permite verificar um aumento de altura da crista da onda no caso do ensaio experimental, à medida que a onda se propaga no canal, devido à redução de área da secção transversal referida na descrição dos ensaios experimentais e ao efeito da redução da profundidade. Este aumento de amplitude na crista da onda também se observa na simulação numérica pelas mesmas razões. Assim, pode-se concluir que os resultados obtidos nesta simulação foram bons, excepto a partir da posição  $x=5\text{m}$  onde se verifica no caso numérico uma pequena perda de amplitude. Esta perda de amplitude deve-se ao facto de as ondas geradas pelo *Waves2Foam* entrarem em rebentação quando a altura,  $H$ , seja superior a  $0.4D$  [13].



**Figura 6.3** - Elevação da superfície livre,  $\eta$ , para uma onda de período  $1.5\text{s}$  e altura de onda de  $0.10\text{ m}$  para as diferentes posições ao longo no canal.

Na figura 6.4 apresentam-se os espectros de amplitude para a onda simulada, medida em diferentes posições do canal. Na tabela 6.3 indicam-se os correspondentes valores obtidos de amplitudes dessas harmônicas. No caso do ensaio experimental, a análise espectral da amplitude foi efectuada utilizando a transformada discreta de Fourier (DFT), sendo que a amplitude de referência neste caso,  $A_{ref}$ , foi metade do valor da altura significativa para a sonda posicionada em  $x=-10m$ , com  $H_{sref}=0.119m$ . Também para esta simulação numérica, recorreu-se à transformada discreta de Fourier, sendo que neste caso a amplitude de referência foi de  $0.05m$ , correspondente a metade da altura de onda para a posição  $x=-10m$ .

É visível que, em ambos os casos, numérico e experimental, à medida que a profundidade do canal diminui, aumenta a amplitude das harmônicas, que era inicialmente praticamente inexistente, e que se torna cada vez mais importante. Este aumento da amplitude das harmônicas deve-se principalmente ao efeito da diminuição da profundidade e redução da área da secção transversal.



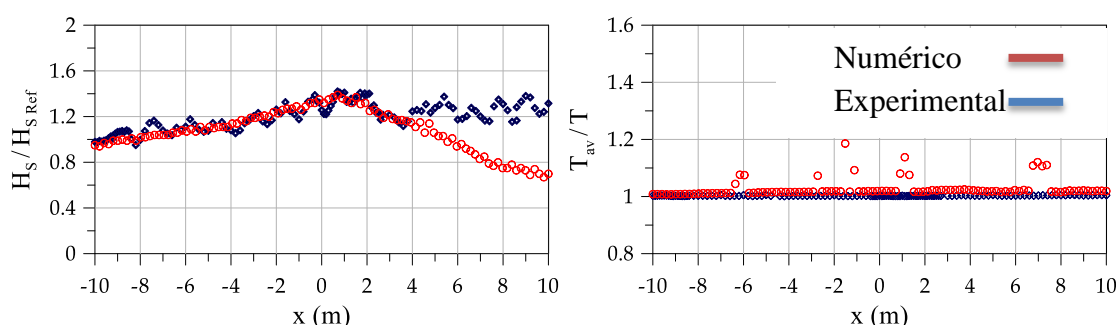
**Figura 6.4** - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T=1.5s$  e  $H=0.1m$ .

**Tabela 6.3 - Valores obtidos nos espectros de amplitude.**

	Caso Numérico				Caso Experimental				
$f.T$	1	2	3	4	1	2	3	4	$x(m)$
$A/A_{ref}$	0.978	0.0697	0.0071	0.0004	0.984	0.106	0.0279	0.0107	-10
	1.09	0.141	0.0229	0.0045	0.962	0.185	0.053	0.0298	-5
	1.16	0.264	0.0299	0.0208	1.14	0.297	0.0757	0.0436	-2
	1.06	0.460	0.1986	0.1024	0.84	0.405	0.217	0.0818	1
	0.852	0.315	0.125	0.0546	0.936	0.472	0.165	0.0653	5

Por fim, na figura 6.5 está representado a evolução da altura significativa,  $H_S$ , e período médio,  $T_{av}$ , para a onda simulada ao longo do canal, tanto para o caso experimental como para o caso numérico. Verifica-se que em ambos os casos ocorre um aumento da altura significativa ao longo do canal devido ao efeito da redução de área da secção transversal e da diminuição da profundidade. No caso numérico, a partir de  $x=4m$  verifica-se que a altura significativa começa a diminuir, ao contrário do caso experimental, sendo que esta perda de altura ocorre devido à dissipação de energia da onda por se encontrar em fase rebentação pois a altura da onda é superior a  $0.4D$ .

Para o período médio, verifica-se que ao contrário do caso experimental onde o período permanece constante, no caso numérico ocorre um pequeno aumento ao longo do canal. Este resultado pode ser explicado pelo facto de no caso numérico ter sido utilizado uma frequência de aquisição de dados de 5Hz, muito menor que os 25Hz utilizados no caso experimental, o que provoca uma maior imprecisão dos resultados.



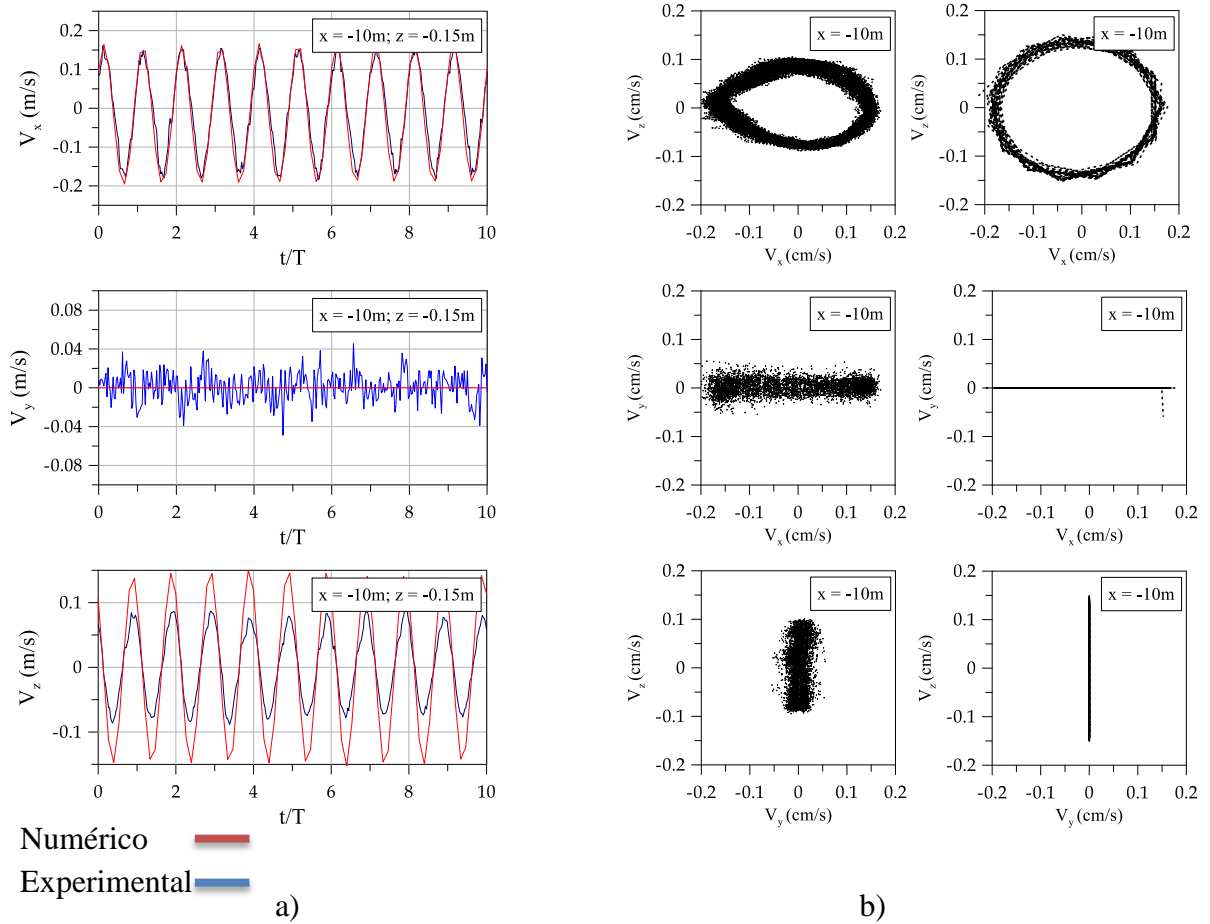
**Figura 6.5 - Altura significativa,  $H_S$ , e período médio,  $T_{av}$ , ao longo do domínio.**

### 6.2.3.2 Análise de velocidades

Nesta simulação foi também efectuada uma análise para as velocidades das partículas do fluido para a posição  $x=-10$ ,  $y=0$  e  $z=-0.15\text{m}$ . Na figura 6.6(a) está representada a comparação da evolução das 3 componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos, entre o caso experimental e o caso numérico.

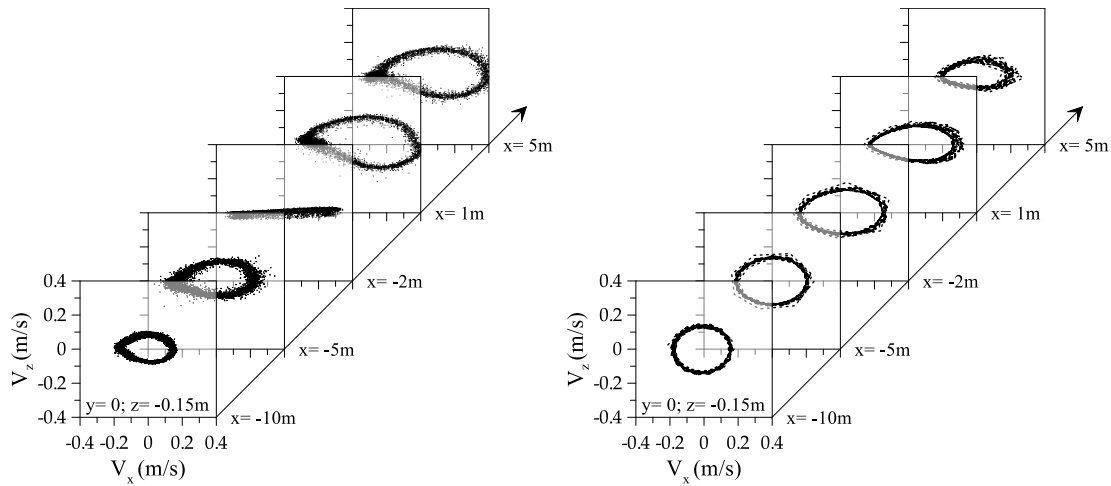
A análise dos resultados permite observar que para a componente  $V_x$  os resultados obtidos nesta simulação são bastante idênticos ao caso experimental, para a componente  $V_y$  a velocidade é praticamente nula no caso numérico. Para a componente  $V_z$ , verifica-se que no caso numérico a velocidade toma uma amplitude de valores ligeiramente superior ao caso experimental, tomando valores próximos dos obtidos para  $V_x$ , o que mostra diferenças lineares entre a onda gerada numericamente e onda gerada nos ensaios experimentais.

Na figura 6.6(b) apresenta-se a distribuição das componentes da velocidade nos planos  $xy$ ,  $xz$  e  $yz$  para a posição  $x=-10\text{m}$ , para os casos experimental e numérico. É então visível que, para o plano  $xz$ , no caso experimental, as partículas da velocidade possuem uma órbita elíptica, enquanto para esta simulação a órbita é praticamente circular, pois as componentes  $V_x$  e  $V_z$  tomam valores aproximados ao longo do tempo. Para os planos  $xy$  e  $yz$  observa-se uma trajectória linear em ambos os casos, pois para o caso experimental a componente  $V_y$  toma valores próximos do 0 e no caso numérico a componente  $V_y$  é praticamente nula.



**Figura 6.6** - a) Evolução das componentes da velocidade em função do tempo, durante 10 períodos, para a posição  $x=10$ ,  $y=0$  e  $z=-0.15\text{m}$  b) Distribuição bidimensional das componentes da velocidade nos planos  $xy$ ,  $xz$  e  $yz$  para a mesma posição, no lado esquerdo para o caso experimental e no direito para o caso numérico.

Na figura 6.7 encontra-se representada a distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano  $xz$  para diferentes posições ao longo do canal de ondas. A comparação entre os casos experimental e numérico permite verificar que no experimental as orbitas elípticas das partículas vão aumentando de dimensão ao longo do canal. Tal é uma consequência directa da transformação que a onda sofre devido à redução da profundidade e da área da secção transversal do canal. Já para esta simulação, verifica-se que para a posição de  $x=-10\text{m}$  as partículas possuem orbitas praticamente circulares, que se vão tornando elípticas e mais alongadas, tal como no caso experimental, à medida que a profundidade diminui ao longo do domínio.



**Figura 6.7** - Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para o plano  $xz$  do canal para o caso experimental (à esquerda) e caso numérico (à direita), nas posições  $x=-10, -5, -2, 1$  e  $5$ ,  $y=0$  e  $z=-0.15$ m.

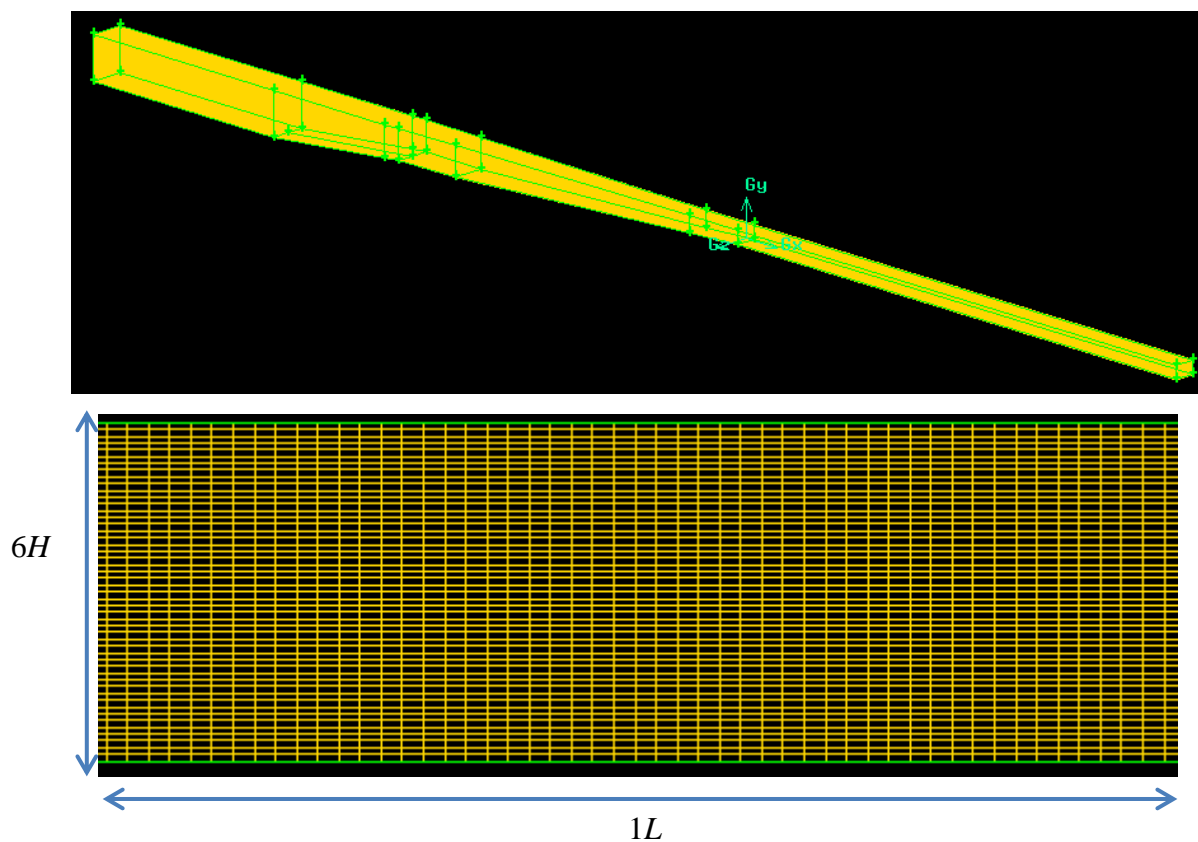
### 6.3 Caso de propagação de ondas regulares com rebentação num canal 3D de profundidade variável

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos na simulação realizada para o caso tridimensional de propagação de ondas regulares com a ocorrência de rebentação baseado nos ensaios experimentais de Endres *et al* [4] no LNEC.

#### 6.3.1 Descrição da malha e esquemas numéricos

Trata-se de um caso tridimensional onde uma vez mais a malha seguiu a geometria do canal apresentado na figura 5.1, tendo apenas sido aumentado o comprimento na zona de geração de ondas até à posição de  $x=-23$ m, passando o canal numérico a possuir um comprimento útil de 38.75m. As rampas de declive 1:20 e 1:2, que serviam para a dissipação da energia das ondas, foram substituídas por uma zona de relaxamento que tem a função de efectuar essa dissipação. A malha tridimensional é constituída por 193750 volumes de controlo, que estão distribuídos de forma a possuir 10 elementos por altura de onda na direcção vertical e um mínimo de 50 elementos por comprimento de onda na direcção horizontal. A variável dimensional,  $d$ , tem o valor de 0.1m pois este trata-se de um caso com rebentação, tendo sido ainda acrescentado mais 0.5m de altura

correspondentes à zona atmosférica. Na figura 6.8 apresenta-se a malha gerada para este caso.



**Figura 6.8** - Malha utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor da malha, em baixo.



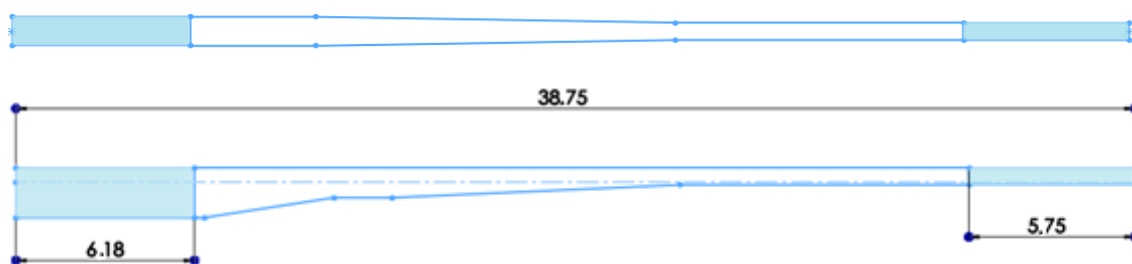
Os esquemas numéricos [15] e algoritmos de resolução [14] utilizados nesta simulação estão representados na tabela 6.4.

***Tabela 6.4 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas regulares com rebentação.***

<b>Esquemas Numéricos</b>	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes Discretização dos termos gradientes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos Laplacianos
<b>Esquemas de Interpolação</b>	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
<b>Algoritmos de Resolução</b>	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da velocidade Equação da fracção de volume

### 6.3.2 Condições de fronteira e iniciais do canal

As condições de fronteira para este caso foram definidas de acordo com as condições de fronteira que foram apresentadas nos casos anteriores. Assim, tem-se à entrada do canal uma zona de relaxamento de geração de ondas, entre as posições  $x=-23\text{m}$  e  $x=-16.82\text{m}$ , com um comprimento de  $6.18\text{m}$ . À saída do canal está colocada uma zona de dissipação de energia de onda entre a posição  $x=10\text{m}$  e  $x=15.75\text{m}$ , possuindo um comprimento de  $5.75\text{m}$ . Para o fundo do canal, definiu-se a condição de velocidade nula. Para o termo da pressão, o gradiente é considerado nulo e para o topo considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A superfície livre encontra-se em  $y=0$ , sendo que no instante  $t=0$ , a superfície encontra-se na horizontal, sem se verificar a propagação de ondas. As zonas de relaxamento no canal encontram-se representadas na figura 6.9 destacadas em azul, sendo que a linha a tracejado simboliza o nível da superfície livre.



**Figura 6.9** - Canal numérico com as zonas de relaxamento destacadas a azul, estando a zona de geração no início do canal e a zona de dissipação no fim deste.

Na tabela 6.5 estão as condições iniciais definidas para a onda regular gerada para esta simulação, correspondente a uma onda regular de primeira ordem, ou onda de Airy.

**Tabela 6.5 - Propriedades da onda simulada para o caso 3D com rebentação.**

Propriedades da onda regular de primeira ordem	
$D$ (na zona de geração)	0.95m
$T$	1.5s
$H$	0.18m
$L$	3.326m

### 6.3.3 Análise e comparação de resultados

O pós-processamento de dados no *OpenFoam* para esta simulação foi efectuado tendo em consideração os mesmos critérios utilizados na análise de resultados experimentais. Assim, ao longo do domínio foram colocadas 100 sondas entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ , espaçadas de 20 cm, de forma a obter os valores da elevação da superfície ao longo do canal e verificar a sua evolução temporal em diferentes posições deste. Os resultados obtidos nesta simulação numérica são aqui apresentados e comparados com os resultados experimentais.

#### 6.3.3.1 Elevação da superfície livre

A análise da elevação da superfície livre permite observar como se dá a propagação da onda ao longo do canal para as condições iniciais definidas, i.e., observar o efeito da

variação da profundidade na forma como a onda se propaga e em que condição se dá a sua rebentação.

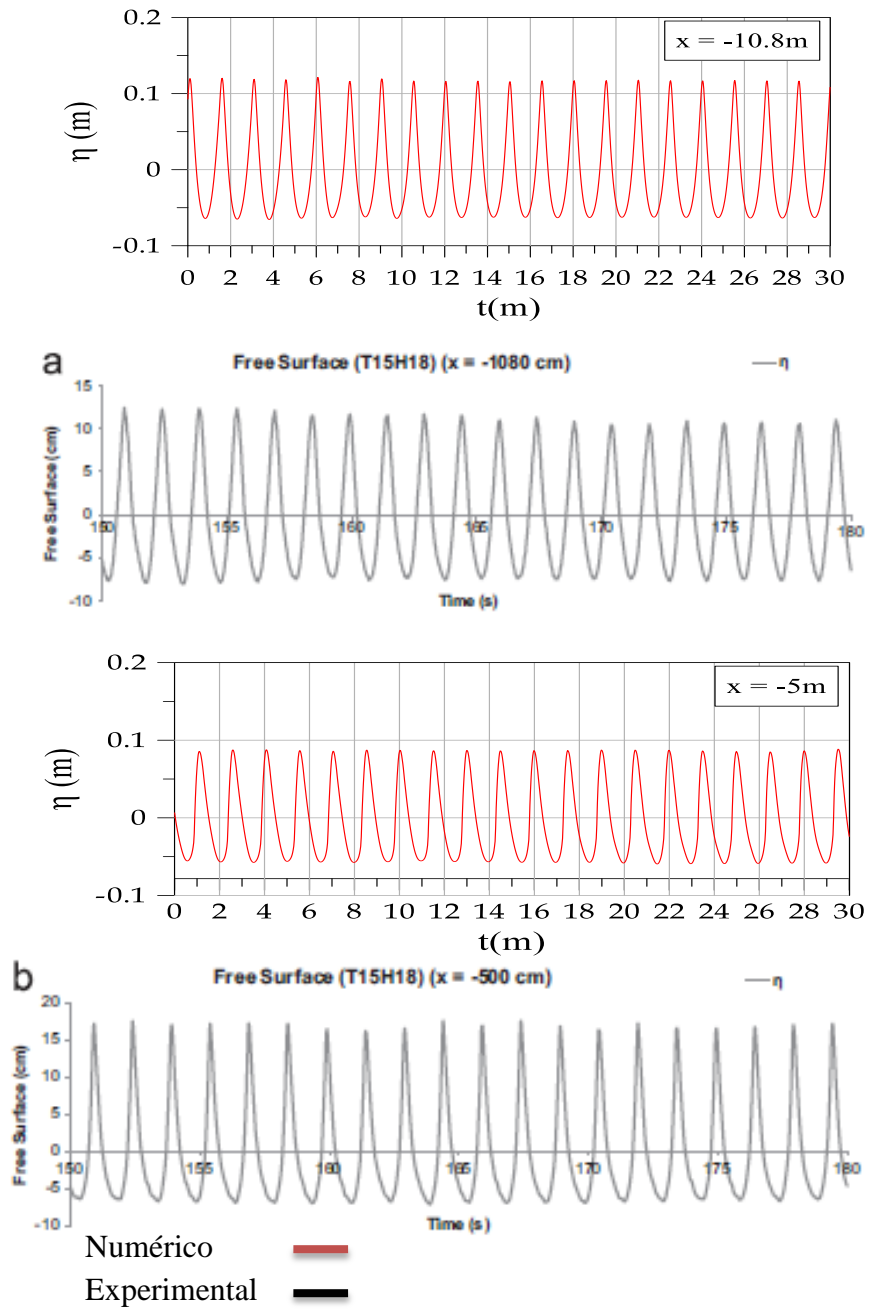
Na figura 6.10 estão representados os resultados obtidos para a elevação da superfície para as posições  $x=-10.8$  e  $-5\text{m}$ , onde a onda ainda se propaga sem perturbações, registadas por sondas para ondas incidentes regulares com o período de  $1.5\text{s}$  e altura de  $0.18\text{m}$  durante  $30\text{s}$ , em comparação com os resultados obtidos experimentalmente para as mesmas condições.

Verifica-se um aumento de altura da crista da onda no caso do ensaio experimental, entre as posições  $x=-10.8$  e  $-5\text{m}$ , devido à redução de área da secção transversal referida na descrição dos ensaios experimentais. No caso numérico não se verifica esse aumento de amplitude da crista de onda. A comparação dos resultados permite constatar que na posição  $x=-10.8\text{m}$  os resultados são semelhantes.

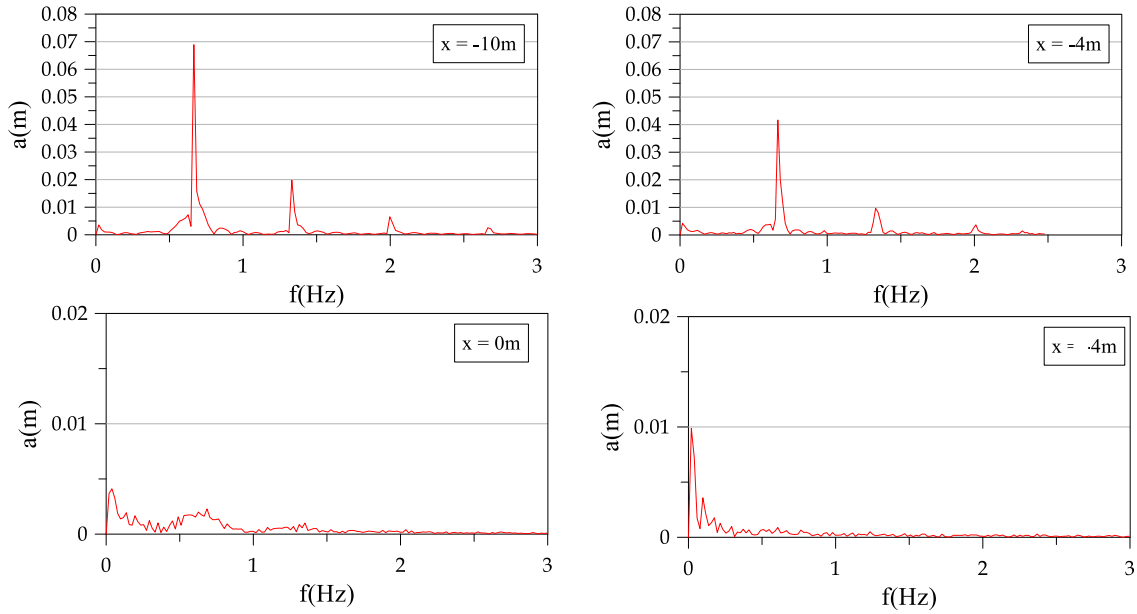
Comparando os resultados para a posição  $x=-5\text{m}$  no caso experimental a onda ainda não rebentou, sendo por isso visível o efeito da redução de área da secção transversal. No caso numérico é visível um decaimento da altura de onda pois a onda já entrou em fase de rebentação. É então notório que a rebentação inicia-se primeiro no caso numérico do que no caso experimental.

Já nas figuras 6.11 e 6.12 apresentam-se os espectros de amplitude para a onda simulada e medida nas posições  $x=-10, -4, 0$  e  $4\text{m}$  do canal. Em ambos os casos, a análise espectral da amplitude foi efectuada utilizando a transformada discreta de Fourier (DFT).

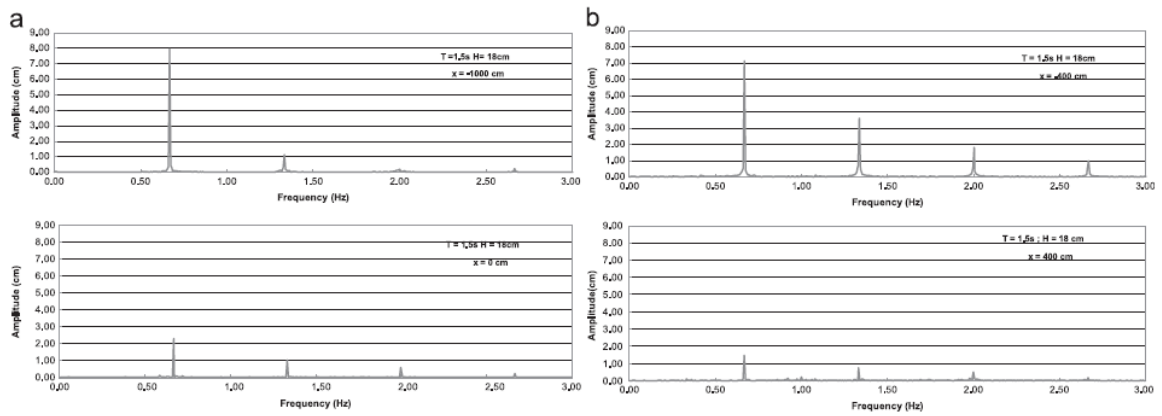
Verifica-se que para as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=-4\text{m}$ , os espectros de amplitude são semelhantes entre o caso numérico e experimental pois ainda não existe a ocorrência da rebentação. Apesar dos espectros serem semelhantes na posição  $x=-4\text{m}$ , os valores da amplitude do caso numérico são inferiores ao caso experimental. Isto deve-se ao facto de a rebentação do caso numérico iniciar-se mais cedo. No caso experimental, verifica-se um aumento de amplitude das harmónicas à medida que a onda se propaga ao longo do canal, sendo que no caso numérico isto não acontece. É visível no caso experimental que, com a rebentação, a amplitude da frequência principal e das harmónicas decrescem muito. Já no caso numérico, após a rebentação, torna-se impossível distinguir a frequência principal das harmónicas, isto acontece devido à não utilização de modelos de turbulência na simulação.



**Figura 6.10** - Elevação da superfície livre,  $\eta$ , para uma onda de período 1.5s e altura de onda de 0.18m para as posições  $x=-10.8$  e  $x=-5\text{m}$  para os casos experimental [4] e numérico.



**Figura 6.11** - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T=1.5s$  e  $H=0.18m$  para caso numérico.



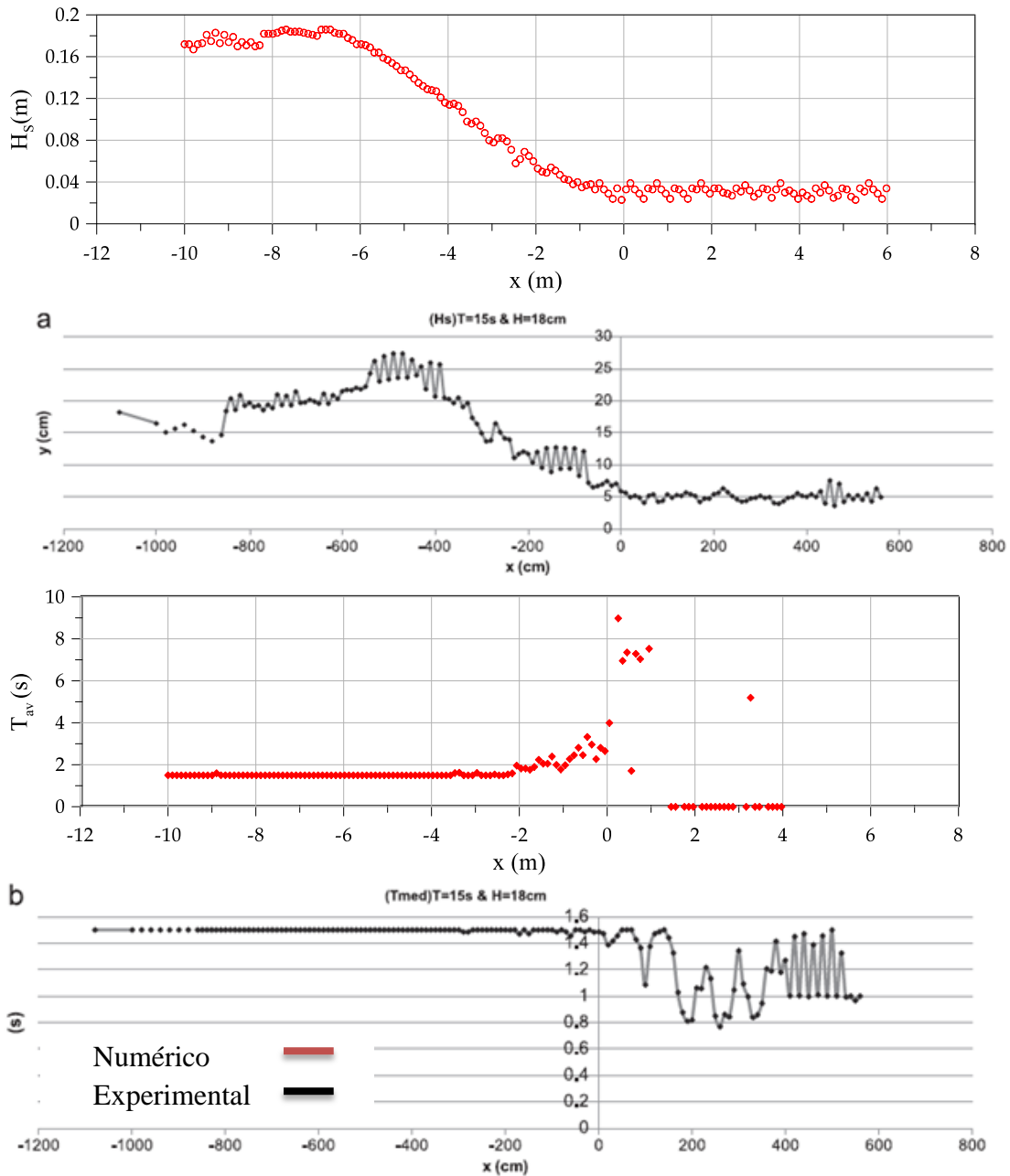
**Figura 6.12** - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T=1.5s$  e  $H=0.18m$  para caso experimental, [4].

Por fim, na figura 6.13 está representada a evolução da altura significativa,  $H_s$ , e período médio,  $T_{av}$ , para a onda simulada ao longo do canal, tanto para o caso experimental como para o caso numérico.

A análise da altura significativa para o caso numérico permite observar que a onda tem um ligeiro aumento de altura à medida que se propaga desde a posição  $x=-10m$  até à posição  $x=-6m$ , devido à redução da área da secção transversal. Tal como aconteceu no caso bidimensional no capítulo 5, a partir dessa posição a onda começa a dissipar energia, perdendo altura até à posição  $x=-2m$  do canal, dando-se a rebentação. No caso experimental, a onda só começa a dissipar energia a partir da posição  $x=-4m$ , sendo que

neste caso, o aumento da altura de onda desde a posição  $x=-10\text{m}$  até  $x=-4\text{m}$  é mais acentuado, atingindo um valor máximo superior a  $0.25\text{m}$ .

Para o período médio observa-se que, em ambos os casos, este permanece constante em  $1.5\text{s}$  até à posição da rebentação. Para o caso numérico, após a rebentação, o período médio começa a dispersar devido à não utilização de modelos de turbulência, enquanto no caso experimental, o período médio sente apenas umas pequenas oscilações de valores.



**Figura 6.13** - Altura significativa,  $H_s$ , e período médio,  $T_{av}$ , para o caso experimental, [4], e numérico ao longo do domínio.

## **6.4 Caso de propagação de ondas bicromáticas com rebentação num canal 3D de profundidade variável**

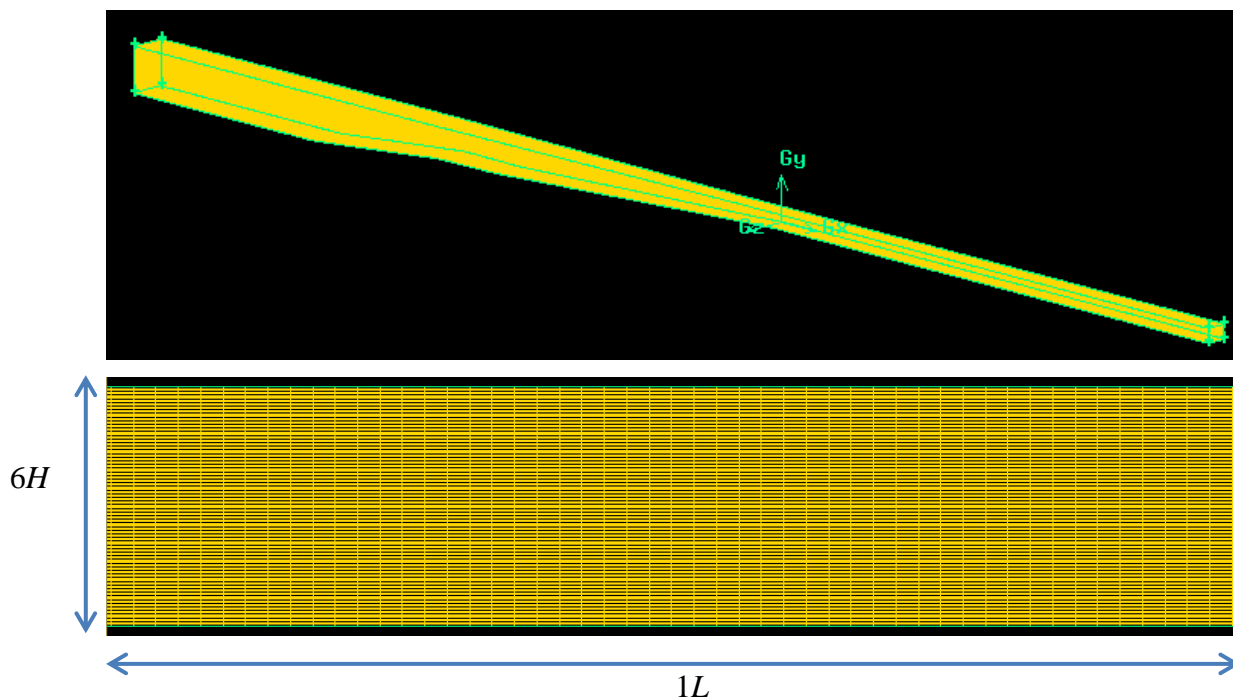
Neste subcapítulo é descrita a simulação realizada para o caso de propagação de ondas bicromáticas com a ocorrência de rebentação para um canal tridimensional.

### **6.4.1 Descrição da malha e esquemas numéricos**

Tal como nos casos anteriores, apesar de ambos os casos de ondas bicromáticas, com e sem rebentação, terem sido realizados no mesmo canal, foi criada uma malha específica para cada um dos casos, de forma respeitar o mínimo de 10 elementos por altura de onda e 50 por comprimento de onda, uma vez que cada ensaio tinha alturas e comprimentos de onda diferentes.

Assim, para este caso específico, a malha seguiu a mesma geometria do canal apresentado no capítulo 5, figura 5.1, tendo apenas sido aumentado o comprimento na zona de geração de ondas até à posição de  $x=-23\text{m}$ , passando o canal numérico a possuir um comprimento útil de 38.75m. Este aumento de comprimento foi efectuado de forma a ter-se a zona de relaxamento entre as posições  $x=-23\text{m}$  até  $x=-16.82\text{m}$ , posição onde se encontra o gerador de ondas no ensaio experimental, para que as ondas que chegam à posição do gerador venham já com as suas propriedades bem definidas e assim a zona de relaxamento não tenha influência nos resultados.

As rampas de declive 1:20 e 1:2 foram retiradas do canal numérico, uma vez que a existência dessas rampas devia-se à dissipação da energia das ondas e essa dissipação no *Waves2Foam* é realizada através das zonas de relaxamento. A malha é então constituída por 889056 volumes de controlo, distribuídos de forma homogénea e a possuir os 10 elementos por altura de onda na direcção vertical e 50 elementos por comprimento de onda na direcção horizontal. Como se trata do caso com rebentação, a variável dimensional,  $d$ , tem o valor de 0.1m, tendo sido acrescentado ainda mais 0.5m correspondentes a uma zona atmosférica. Na figura em 6.14 apresenta-se a malha gerada para este caso tridimensional.



**Figura 6.14** - Malha utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor dos elementos da malha, em baixo.

Para esta simulação foram utilizados os esquemas numéricos e algoritmos de resolução indicados na tabela 6.6.

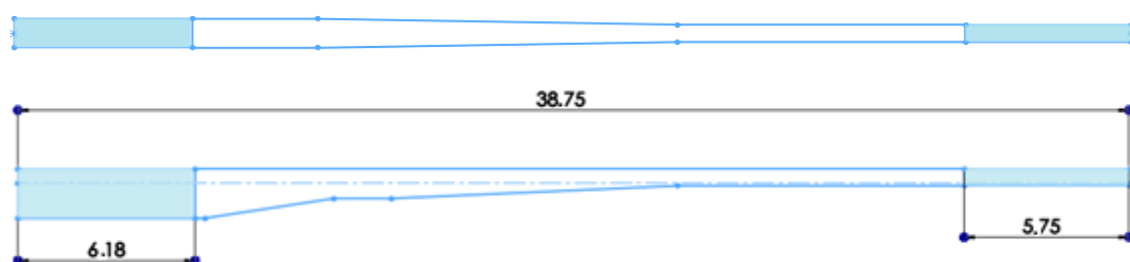
**Tabela 6.6** - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas bicromáticas com rebentação.

Esquemas Numéricos	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes
	Discretização dos termos gradientes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos Laplacianos
Esquemas de Interpolação	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
Algoritmos de Resolução	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da velocidade
	Equação da fracção de volume



### 6.4.2 Condições de fronteira e iniciais do canal

Como condições de fronteira, definiram-se duas zonas de relaxamento, de geração e dissipação de ondas, sendo a zona de geração colocada à entrada do canal, entre as posições  $x=-23\text{m}$  e  $x=-16.82\text{m}$ , com um comprimento de  $6.18\text{m}$ . A zona de dissipação está colocada entre a posição  $x=10\text{m}$  e  $x=15.75\text{m}$ , possuindo um comprimento de  $5.75\text{m}$ . Para o fundo do canal e para as paredes laterais, definiu-se a condição de velocidade nula. Para o termo da pressão, o gradiente é considerado nulo e para o topo considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A cota da superfície de água encontra-se em  $y=0$ , sendo que no instante  $t=0$ , a superfície encontra-se na horizontal, sem se verificar a propagação de ondas. Na figura 6.15 apresenta-se a geometria do canal e das zonas de relaxamento para este caso.



**Figura 6.15** - Representação das zonas de relaxamento para o canal numérico utilizado nesta simulação.

A onda gerada para esta simulação corresponde a uma onda bicromática e possui as características apresentadas na tabela 6.7.

**Tabela 6.7** - Características da onda bicromática gerada numericamente.

Propriedades da onda bicromática	
$D$ (na zona de geração)	0.95m
$T_1$	1.5s
$T_2$	1.1s
$H$	0.08m

### 6.4.3 Análise e comparação de resultados

Os resultados obtidos para esta simulação numérica foram comparados com os resultados experimentais. O pós-processamento de dados no *OpenFoam* foi efectuado respeitando os mesmos critérios na análise de resultados experimentais [5]. Ao longo do domínio foram então colocadas 200 sondas entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ , espaçadas de 10cm, de forma a retirar os valores da elevação ao longo do domínio e verificar a evolução temporal da elevação da superfície livre em diferentes posições do canal. Também para a velocidade foram colocadas sondas respeitando as posições definidas nos ensaios experimentais.

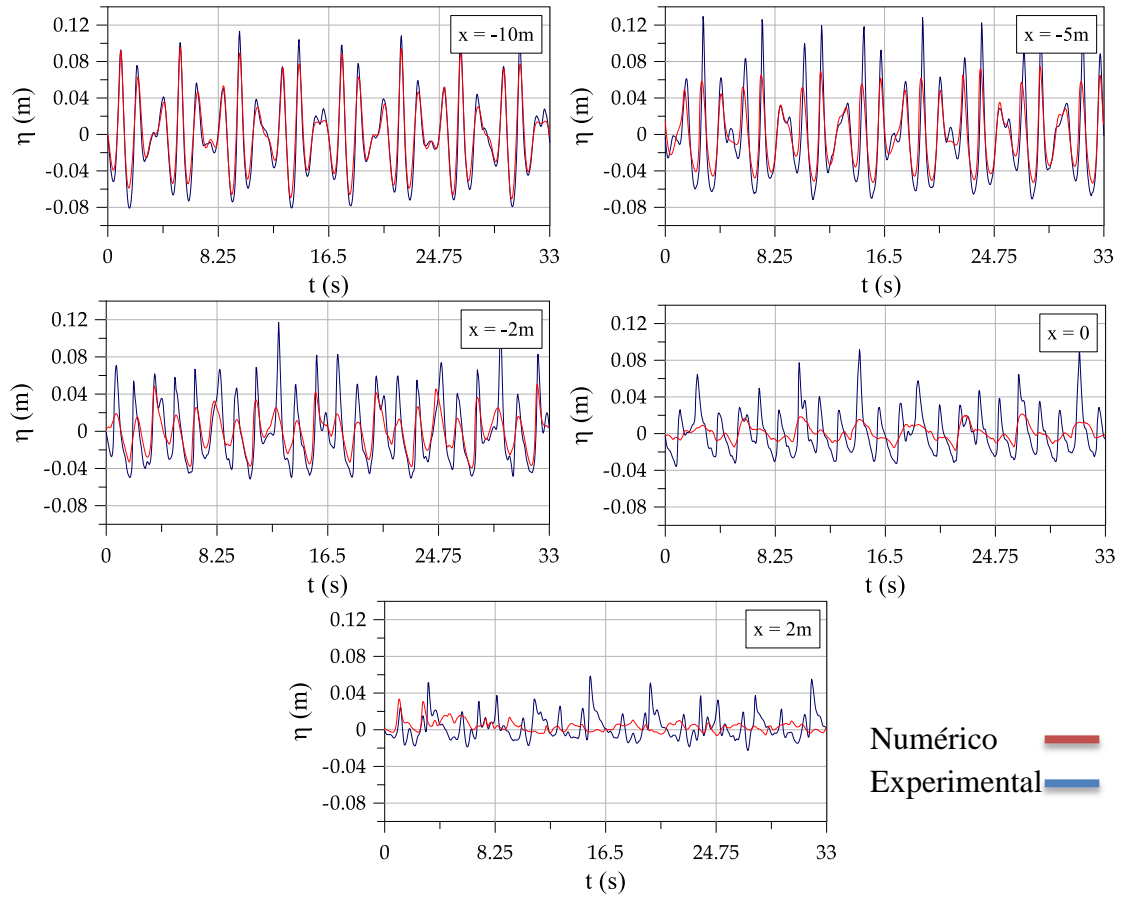
#### 6.4.3.1 Elevação da superfície livre

A análise da elevação da superfície livre teve o intuito de observar como se propaga a onda ao longo do canal para as condições iniciais definidas, i.e., observar como a onda se altera com a variação da profundidade. Na figura 6.16 estão representados os resultados obtidos da elevação da superfície para as posições  $x=-10,-5,-2,1$  e  $5\text{m}$ , registadas por sondas para ondas bicromáticas incidentes com períodos de 1.5s e 1.1s e altura de 0.08m durante 33s, correspondentes ao período de 8 envelopes, sobrepostos aos valores obtidos experimentalmente para as mesmas posições.

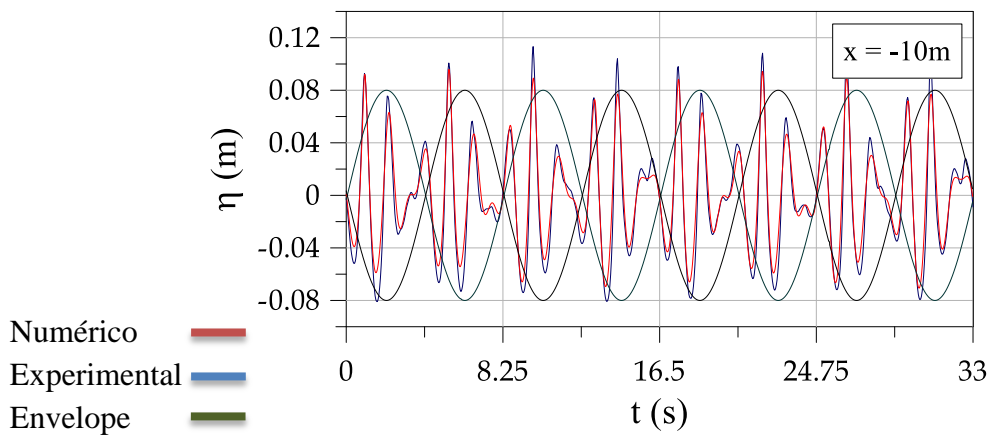
A comparação de resultados, para a posição  $x=-10\text{m}$ , permite verificar um aumento de altura da crista da onda no caso do ensaio experimental, à medida que a onda se propaga no canal, devido à redução de área da secção transversal referida na descrição dos ensaios experimentais e ao efeito da redução da profundidade. Este aumento de amplitude na crista da onda também se observa na simulação numérica pelas mesmas razões.

Para a posição  $x=-5\text{m}$  verifica-se uma ligeira perda de amplitude no caso numérico, que corresponde ao início da rebentação. A partir da posição  $x=-2\text{m}$ , onde já se observa o efeito da rebentação, já não se verifica uma boa correspondência de resultados. Esta discrepância nos resultados pode resultar da não utilização de modelos de turbulência. Na figura 6.17 encontra-se representado a evolução da superfície livre e o correspondente envelope teórico para uma altura de onda de 0.08m. Verifica-se uma

repetibilidade na propagação da onda bicromática ao fim do período de 4 envelopes, correspondendo a uma periodicidade de  $4T_{env}$ .



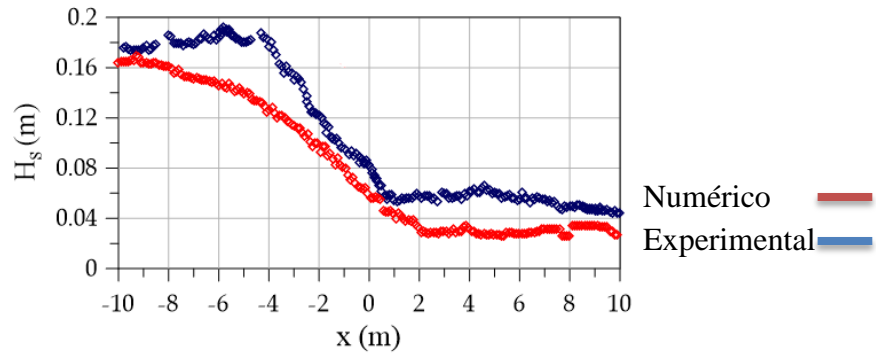
**Figura 6.16** - Elevação da superfície livre,  $\eta$ , para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s, e altura de onda de 0.08 m para as diferentes posições ao longo no canal.



**Figura 6.17** - Elevação da superfície livre para a posição  $x=-10m$  e correspondente envelope teórico para uma onda bicromática de  $T_1=1.5s$ ,  $T_2=1.1s$  e  $H=0.08m$ .

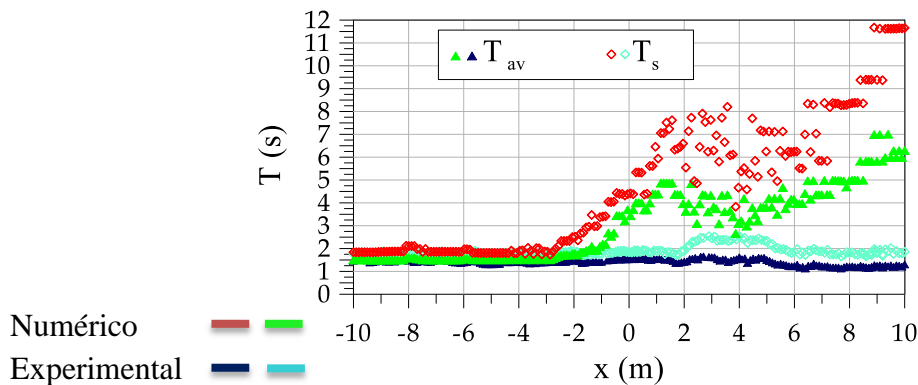
Na figura 6.18 encontra-se representada a altura significativa, entre as posições  $x=-10m$  e  $x=10m$  do canal, para os casos experimental e numérico. Verifica-se que, no caso numérico, os resultados da altura significativa não correspondem ao esperado, uma

vez que a altura significativa é sempre um pouco inferior ao caso experimental. Esta perda de altura deve-se ao facto de no caso da simulação numérica o tempo de simulação ter sido inferior ao do caso experimental, o que influencia a análise da altura significativa. Também o declive em ambas as curvas até à rebentação não é idêntico, o que pode dever-se também ao facto de a rebentação na onda gerada numericamente se iniciar mais cedo do que no caso experimental, uma vez que no *Waves2Foam* uma onda inicia a rebentação para alturas,  $H$ , superiores a  $0.4D$ .



**Figura 6.18** - Altura significativa para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.08m entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ .

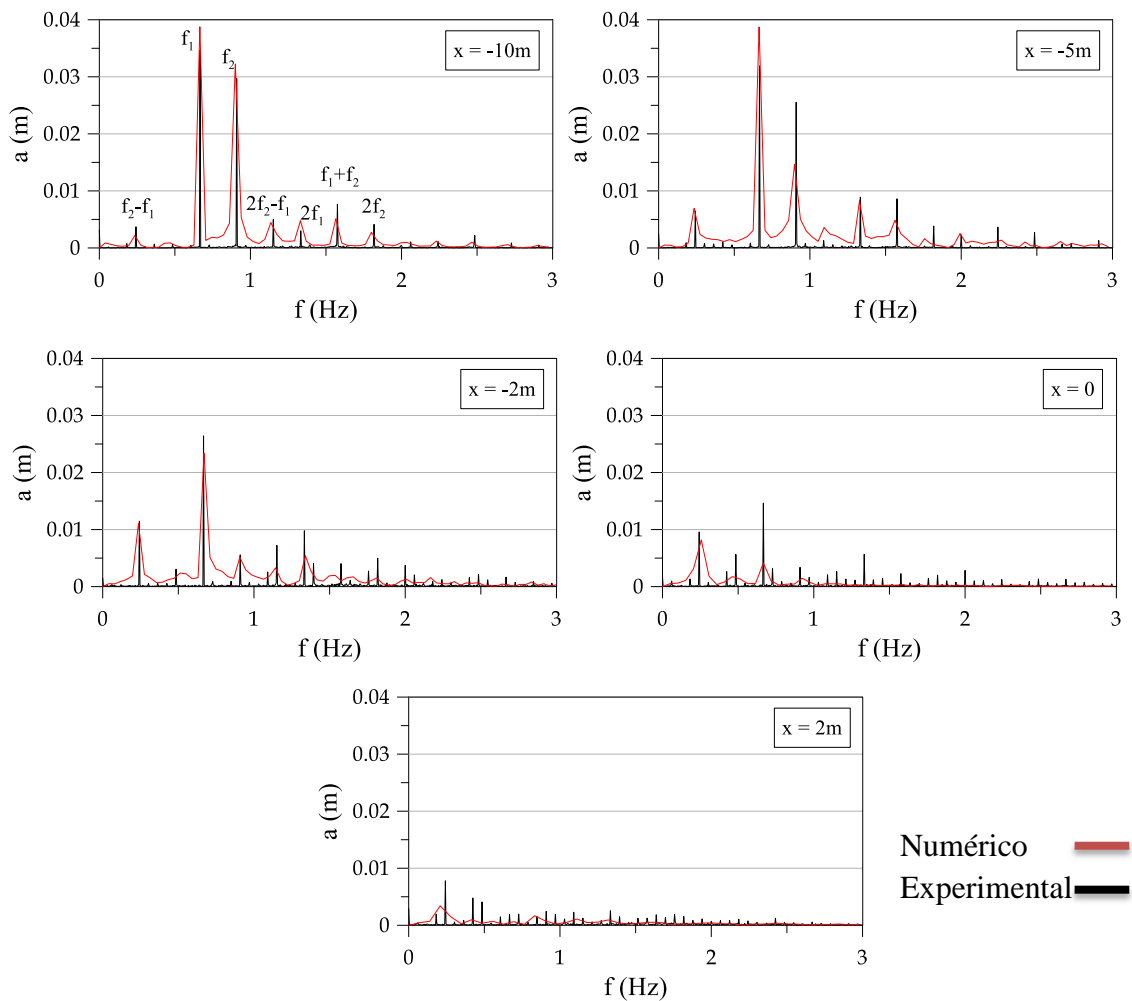
Na figura 6.19 está representado o período significativo,  $T_s$ , e médio,  $T_{av}$ , entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$  do canal. No caso dos períodos médio e significativo verifica-se que a partir da posição  $x=-2\text{m}$ , onde já se está em fase de rebentação, ocorre uma discrepância de resultados no caso numérico o que pode dever-se ao facto de a simulação ter sido realizada sem modelos de turbulência.



**Figura 6.19** - Período significativo e médio para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.08m entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ .

Na figura 6.20 apresentam-se os espectros de amplitude para a onda simulada e medida em diferentes posições do canal. Em ambos os casos, a análise espectral da

amplitude foi efectuada através da transformada discreta de Fourier (DFT). Verifica-se que os resultados numéricos obtidos são semelhantes aos experimentais até à ocorrência de rebentação. Para a posição  $x=-10\text{m}$ , a amplitude das duas frequências fundamentais é próxima da amplitude imposta para a onda bicromática, de  $0.04\text{m}$ . Em ambos os casos é visível o aparecimento de componentes harmónicas devido à transformação das ondas ao longo do canal com a variação da profundidade, principalmente a partir da posição  $x=-5\text{m}$  onde se inicia a rebentação. Nesta situação, a amplitude das frequências fundamentais,  $f_1$  e  $f_2$ , começa a diminuir. Estas componentes harmónicas são pois a combinação entre as duas frequências fundamentais,  $f_1=1/T_1$ , correspondente a  $0.909\text{Hz}$ , e  $f_2=1/T_2$ , correspondente a  $0.667\text{Hz}$ .



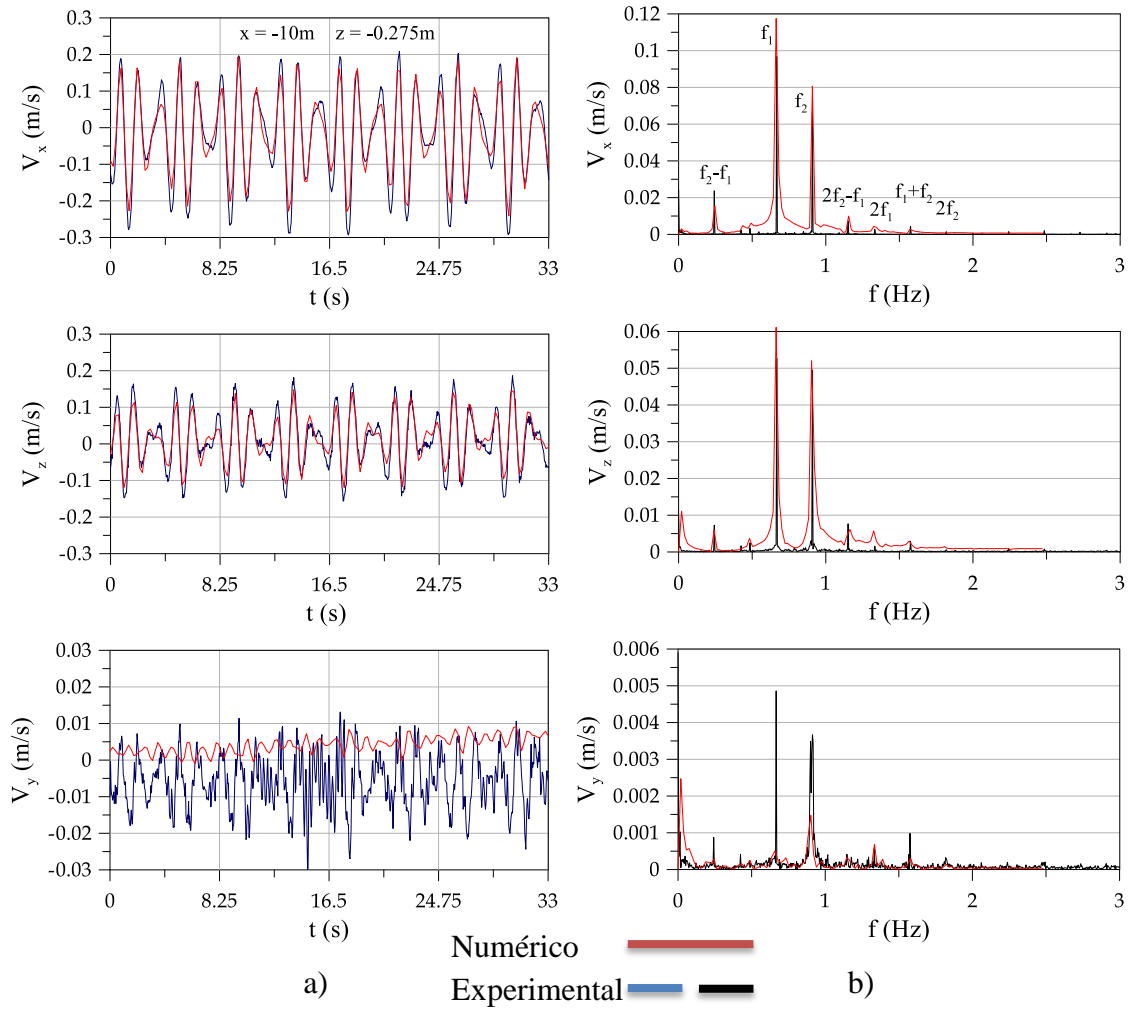
**Figura 6.20** - Espectros de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T_1=1.5\text{s}$ ,  $T_2=1.1\text{s}$  e  $H=0.08\text{m}$ .

### 6.4.3.2 Análise de velocidades

Foi também analisada a velocidade das partículas do fluido para a posição  $x=-10\text{m}$ ,  $y=0\text{m}$  e  $z=-0.275\text{m}$ .

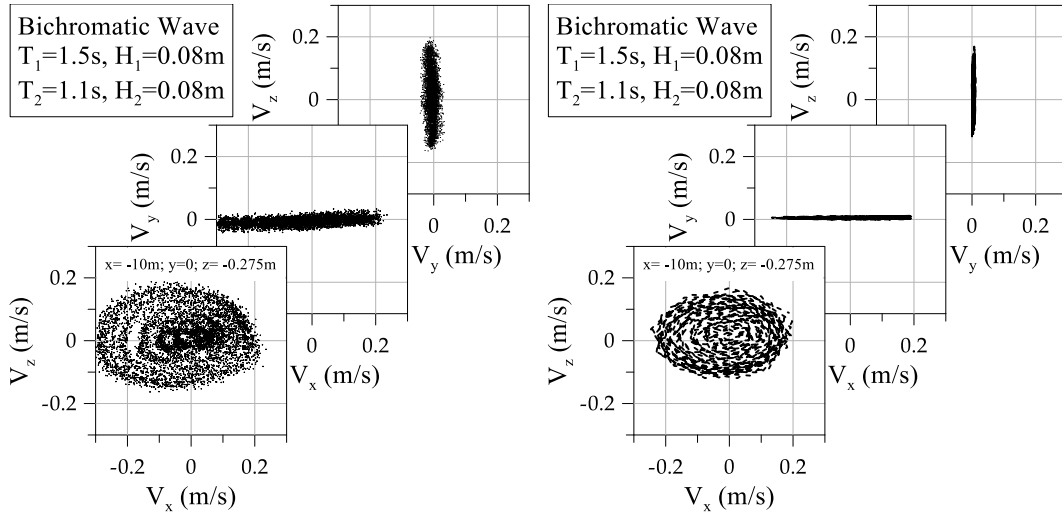
Na figura 6.21(a) está representada a comparação da evolução das 3 componentes da velocidade em função do tempo, durante 33s, entre o caso experimental e o caso numérico. Observar-se que, para a componente  $V_x$  e  $V_z$ , os resultados obtidos nesta simulação são bastante idênticos ao caso experimental. Para a componente  $V_y$  a velocidade é praticamente nula no caso numérico. Tal como acontece no caso experimental, para a simulação numérica é possível observar uma periodicidade de  $4T_{env}$  para as componentes  $V_x$  e  $V_z$ .

Na figura 6.21(b) encontram-se representados os respectivos espectros de amplitude para cada uma das componentes da velocidade. Os espectros de amplitude, tal como no caso da elevação da superfície livre, foram obtidos através da DFT. Comparando os espectros referentes a cada um dos casos, conclui-se que, para as componentes  $V_x$  e  $V_z$ , os resultados obtidos foram bastante semelhantes. Para a componente  $V_x$  e  $V_z$  as frequências mais relevantes são as frequências fundamentais  $f_1$  e  $f_2$  e a frequência de envelope,  $f_{env}=f_2-f_1$ . É para a componente  $V_y$  onde ocorre uma maior discrepância nos resultados, sendo que para o caso experimental as frequências relevantes são as frequências fundamentais  $f_1$  e  $f_2$ , a frequência de envelope,  $f_{env}=f_2-f_1$  e  $f_2+f_1$ , já para o caso numérico são a frequência fundamental  $f_2$  e  $2f_1$ .



**Figura 6.21** - a) Evolução das componentes da velocidade em função do tempo, durante o período de  $8T_{env}$  (33s), para a posição  $x=-10$ ,  $y=0$  e  $z=-0.275\text{m}$ . b) Correspondentes espectros de amplitude para cada uma das componentes da velocidade.

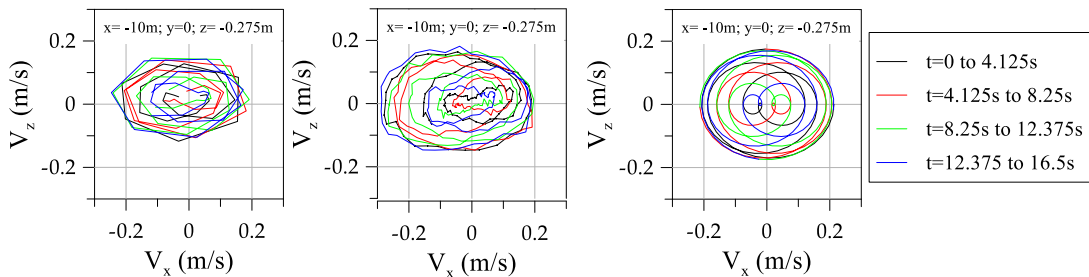
Na figura 6.22 encontra-se representada a distribuição bidimensional das componentes da velocidade no plano  $xz$ ,  $xy$  e  $yz$  para a posição  $x=-10\text{m}$ ,  $y=0\text{m}$  e  $z=-0.275\text{m}$  do canal de ondas. A comparação entre os casos experimental e numérico permite verificar que em ambos os casos, para o plano  $xz$ , é visível uma dispersão de pontos com uma forma elíptica. Para os planos  $xy$  e  $yz$ , é visível uma dispersão de pontos quase numa linha recta devido ao facto de a componente da velocidade  $V_y$  ser praticamente nula.



**Figura 6.22** - Distribuição bidimensional das componentes da velocidade para os planos  $xz$ ,  $xy$  e  $yz$  do canal para o caso experimental (à esquerda) e caso numérico (à direita), para a posição  $x=-10$   $y=0$  e  $z=-0.275$ m.

Finalmente, na figura 6.23 encontra-se representada a distribuição da velocidade num plano bidimensional  $xz$  para os casos numérico, experimental e teórico respectivamente, durante 16.5s correspondentes ao período de 4 envelopes,  $4T_{env}$ , sendo que para cada período de envelope a linha é desenhada de uma cor diferente.

É possível observar que, ao contrário do esperado teoricamente, nos casos experimental e numérico as distribuições de velocidade possuem aspectos elípticos devido ao efeito da variação da profundidade no canal em relação à zona de geração de onda. Também ao contrário do esperado teoricamente, onde além do aspecto circular este possui uma linha regular, nos casos experimentais e numéricos, a linha é irregular. Tal é possível devido a pequenas reflexões nas paredes do canal na zona da redução da área transversal e também, para o caso experimental, devido a imprecisões nas medições das sondas de nível ADV.



**Figura 6.23** - Distribuição da velocidade no plano bidimensional  $xz$  para o caso numérico (esquerda), experimental (centro), [17], e teórico (direita), [17], para a posição  $x=-10$ ,  $y=0$  e  $z=-0.275$ m durante 16.5s ( $4T_{env}$ ).



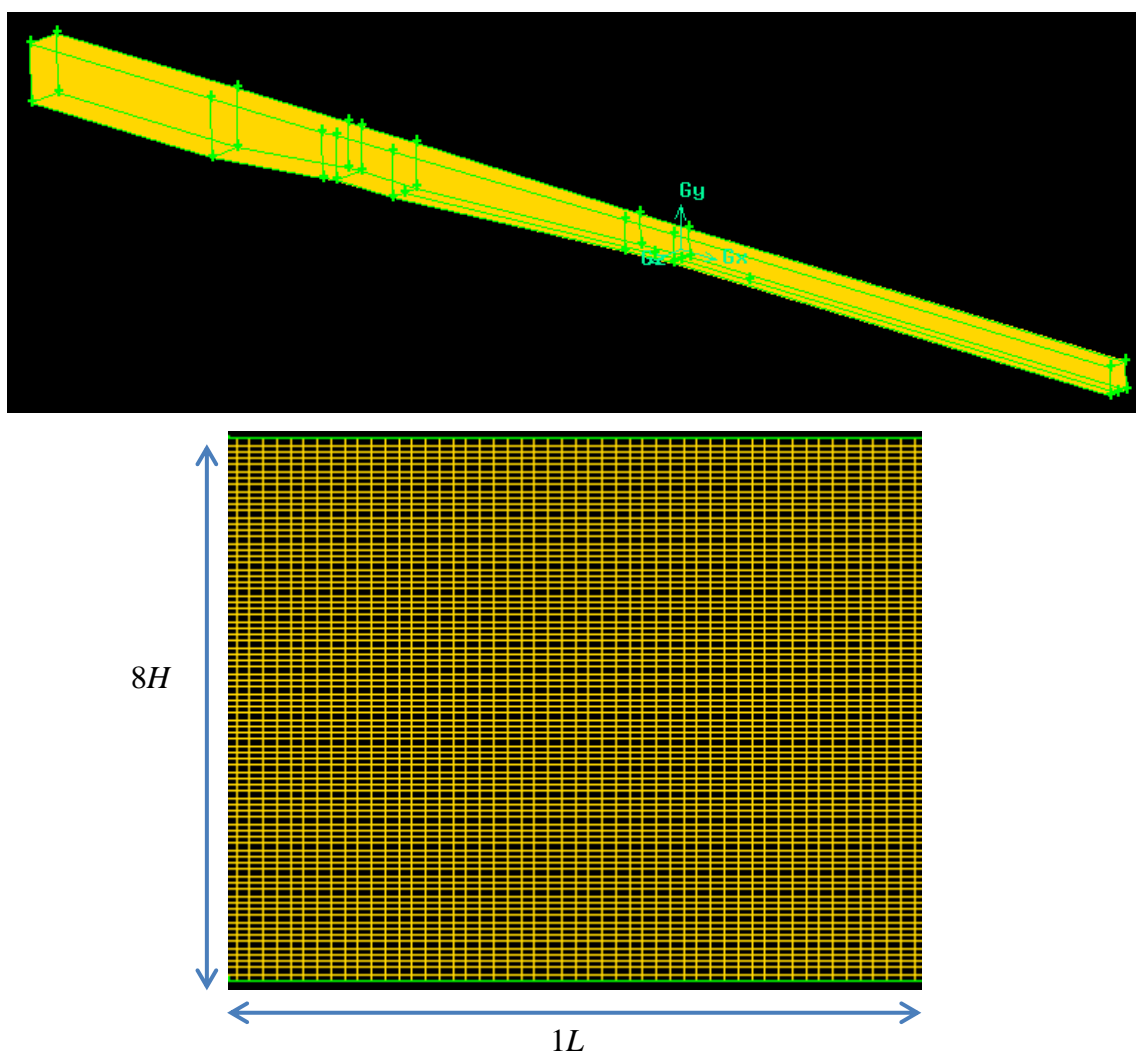
## **6.5 Caso de propagação de ondas bicromáticas sem rebentação num canal 3D de profundidade variável**

Neste subcapítulo é apresentado o último caso simulado para esta dissertação. Trata-se de um caso tridimensional de propagação de ondas bicromáticas sem a ocorrência de rebentação no mesmo canal utilizado nos restantes casos.

### **6.5.1 Descrição da malha e esquemas numéricos**

A malha criada para este caso seguiu as mesmas especificações utilizadas nos casos anteriores. Assim, o canal numérico foi desenhado seguindo a mesma geometria do canal apresentado no capítulo 5, figura 5.1, tendo apenas sido aumentado o comprimento na zona de geração de ondas até à posição de  $x=-23\text{m}$ , passando o canal numérico a possuir um comprimento útil de  $38.75\text{m}$ .

Este aumento do comprimento, tal como nos casos anteriores, teve o intuito de colocar a zona de geração de ondas entre as posições  $x=-23\text{m}$  e  $x=-16.82\text{m}$ , para que a onda gerada chegue à posição onde se encontra o gerador de ondas do caso experimental já com as suas propriedades bem definidas e assim a zona de relaxamento não tenha influência nos resultados. Uma zona de relaxamento para a dissipação de ondas é colocada também no final do canal numérico, entre as posições  $x=10\text{m}$  e  $x=15.75\text{m}$ , substituindo assim as rampas de declive 1:20 e 1:2, uma vez que a existência dessas rampas devia-se à dissipação da energia das ondas. A malha é então constituída por 322020 volumes de controlo, distribuídos de forma homogénea e a possuir os 10 elementos por altura de onda na direcção vertical e 50 elementos por comprimento de onda na direcção horizontal. Como se trata do caso sem rebentação, a variável dimensional,  $d$ , tem o valor de  $0.3\text{m}$ , tendo sido acrescentado ainda mais  $0.5\text{m}$  correspondentes a uma zona atmosférica. Na figura 6.24 encontra-se uma representação da malha gerada para esta simulação numérica.



**Figura 6.24** - Malha utilizada para esta simulação, em cima, e pormenor dos elementos da malha, em baixo.

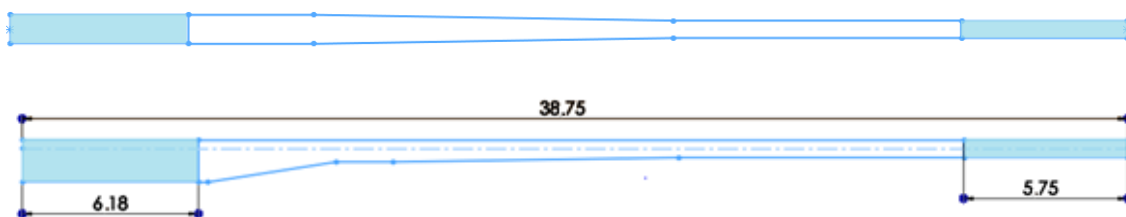
Os esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados nesta simulação são os indicados na tabela 6.8.

***Tabela 6.8 - Esquemas numéricos e algoritmos de resolução utilizados no caso de ondas bicromáticas sem rebentação.***

<b>Esquemas Numéricos</b>	
Esquema de Euler	Discretização da derivada temporal
Método de Gauss	Discretização dos termos divergentes Discretização dos termos gradientes
Gauss Linear Corrected	Discretização dos termos Laplacianos
<b>Esquemas de Interpolação</b>	
LimitedLinearV1	Campo de velocidade
Esquema de MUSCL	Fracção de volume
InterfaceCompression	Compressão da fracção de volume
<b>Algoritmos de Resolução</b>	
GAMG Linear-Solver	Equação da pressão
PBiCG	Equação da velocidade Equação da fracção de volume

### **6.5.2 Condições de fronteira e iniciais do canal**

As condições de fronteira que foram utilizadas neste caso são idênticas às utilizadas nos casos anteriores. Assim, foram definidas duas zonas de relaxamento, para a geração e dissipação de ondas, com a zona de geração a ser colocada à entrada do canal, entre as posições  $x=-23\text{m}$  e  $x=-16.82\text{m}$  como referido em cima, com um comprimento total de  $6.18\text{m}$ . Já a zona de dissipação foi colocada entre as posições  $x=10\text{m}$  e  $x=15.75\text{m}$ , possuindo um comprimento de  $5.75\text{m}$ . Definiu-se a condição de velocidade nula para o fundo do canal e para as paredes laterais. Para o termo da pressão, definiu-se que o gradiente é considerado nulo e para o topo do canal considerou-se a condição de permeabilidade e de admissão de ar. A cota da superfície de água encontra-se em  $y=0$ , sendo que no instante  $t=0$ , a superfície encontra-se na horizontal, sem se verificar a propagação de ondas. As zonas de relaxamento para este canal encontram-se representadas na figura 6.25.



**Figura 6.25** - Representação das zonas de relaxamento para o canal numérico utilizado nesta simulação.

A onda bicromática gerada para esta simulação possui as características apresentadas na tabela 6.9.

**Tabela 6.9** - Características da onda bicromática gerada numericamente.

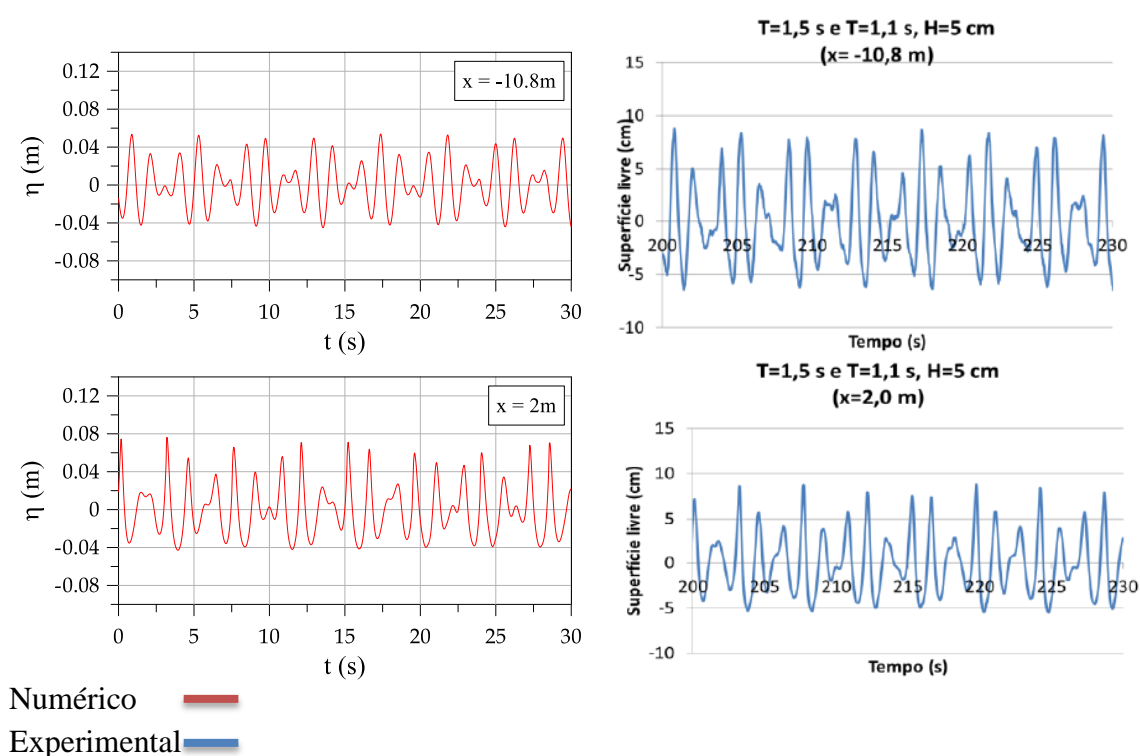
Propriedades da onda bicromática	
$D$ (na zona de geração)	1.15m
$T_1$	1.5s
$T_2$	1.1s
$H$	0.05m

### 6.5.3 Análise e comparação de resultados

Os resultados obtidos para esta simulação numérica são aqui apresentados em comparação com os resultados experimentais. Tal como no caso anterior, o pós-processamento de dados no *OpenFoam* foi efectuado respeitando os mesmos critérios na análise de resultados experimentais [5]. Assim, a elevação da superfície ao longo do domínio foi analisada através da colocação de 200 sondas entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ , espaçadas de 10cm, com o objectivo de retirar os valores da elevação ao longo do domínio e verificar a evolução temporal da elevação da superfície livre em diferentes posições do canal. Também foram colocadas sondas para medir a velocidade respeitando as posições definidas nos ensaios experimentais.

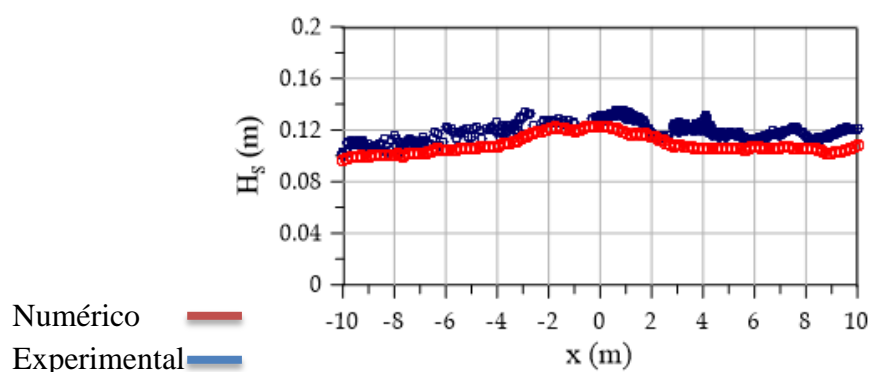
### 6.5.3.1 Elevação da superfície livre

Na figura 6.26 estão representados os resultados obtidos para a elevação da superfície para as posições  $x=-10.8$  e  $2\text{m}$ , registadas por sondas para ondas bicromáticas incidentes com períodos de  $1.5\text{s}$  e  $1.1\text{s}$  e altura de  $0.05\text{m}$ , durante  $30\text{s}$ , em comparação com os resultados obtidos experimentalmente para as mesmas posições. Para a posição  $x=-10.8\text{m}$ , verifica-se um aumento de altura da crista da onda no caso do ensaio experimental devido à redução de área da secção transversal referida na descrição dos ensaios experimentais e ao efeito da redução da profundidade. Já no caso numérico, esse aumento de altura de onda ainda não é bem visível nesta posição, sendo que para a posição  $x=2\text{m}$  o resultado numérico já está mais próximo do experimental. É portanto, visível em ambos os casos que ocorre um aumento da altura de onda entre as duas posições, à medida que a onda se propaga ao longo do canal, por efeito tanto da redução da área da secção transversal como da variação da profundidade.



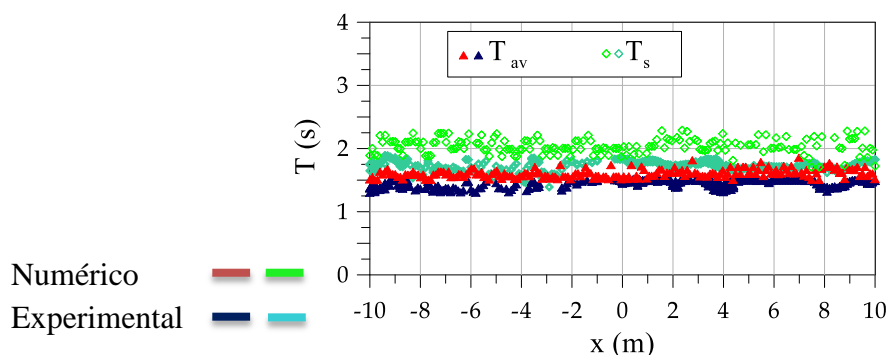
**Figura 6.26** - Elevação da superfície livre,  $\eta$ , para uma onda bicromática de períodos  $1.5\text{s}$  e  $1.1\text{s}$ , e altura de onda de  $0.05\text{ m}$  para as diferentes posições ao longo no canal, para o caso experimental [5] e numérico.

Na figura 6.27 encontra-se o gráfico para as alturas significativas, tanto do caso experimental como do numérico, entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$  do canal. Verifica-se que os resultados da altura significativa são bastante semelhantes, apesar de no caso numérico este seja ligeiramente inferior. Esta perda poderá dever-se a um mau refinamento da malha ou a um tempo de simulação inferior em relação ao caso experimental, o que tem influência na altura significativa. Pode concluir-se que em ambos os casos a propagação da onda ocorre de forma idêntica, uma vez que as curvas têm um comportamento semelhante.



**Figura 6.27** - Altura significativa para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.05m entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ .

O período significativo,  $T_s$ , e médio,  $T_{av}$ , entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$  do canal encontram-se representados na figura 6.28. No caso do período médio, é possível verificar que em ambos os casos os resultados foram semelhantes, sendo que o período mantém um valor praticamente constante ao longo do canal próximo de 1.5s. Para o período significativo, também se verifica que no caso experimental o período mantém um valor praticamente constante ao longo do canal, sendo que no caso numérico o período significativo mostra alguma dispersão com os valores a rondar os 2s.



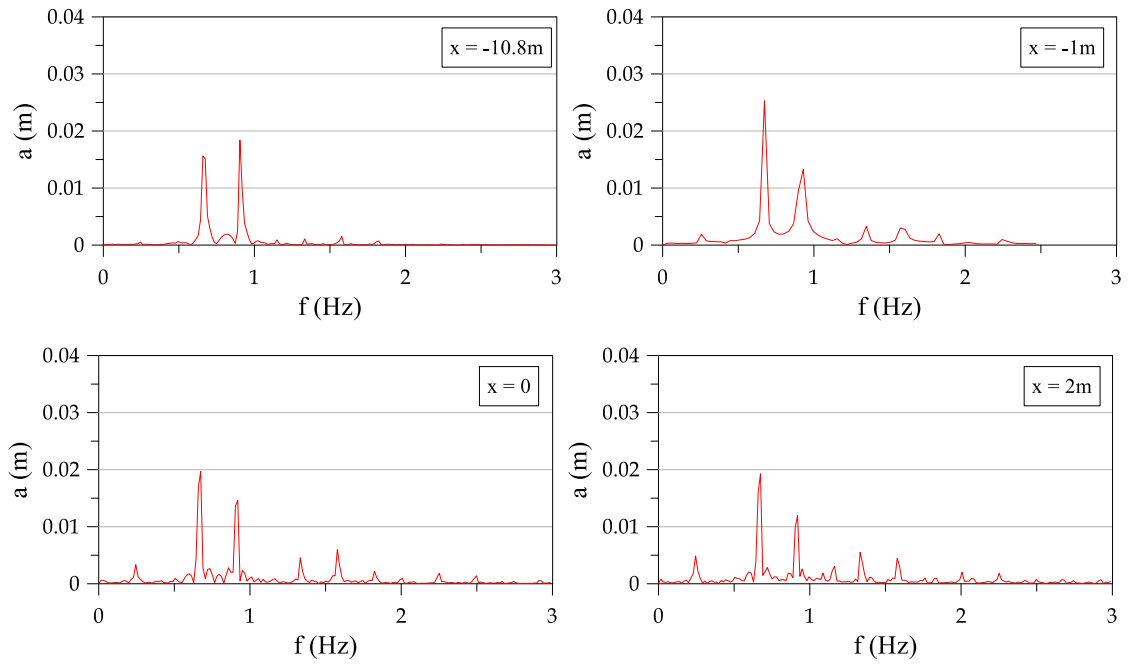
**Figura 6.28** - Período significativo e médio para uma onda bicromática de períodos 1.5s e 1.1s e altura de 0.05m entre as posições  $x=-10\text{m}$  e  $x=10\text{m}$ , para o caso numérico e experimental.

Por fim, nas figuras 6.29 e 6.30 apresentam-se os espectros de amplitude para a onda simulada e medida para as posições  $x=-10.8, -1, 0$  e  $2\text{m}$ . Em ambos os casos, a análise espectral da amplitude foi efectuada através da transformada discreta de Fourier (DFT). Verifica-se que os resultados diferem entre os dois casos.

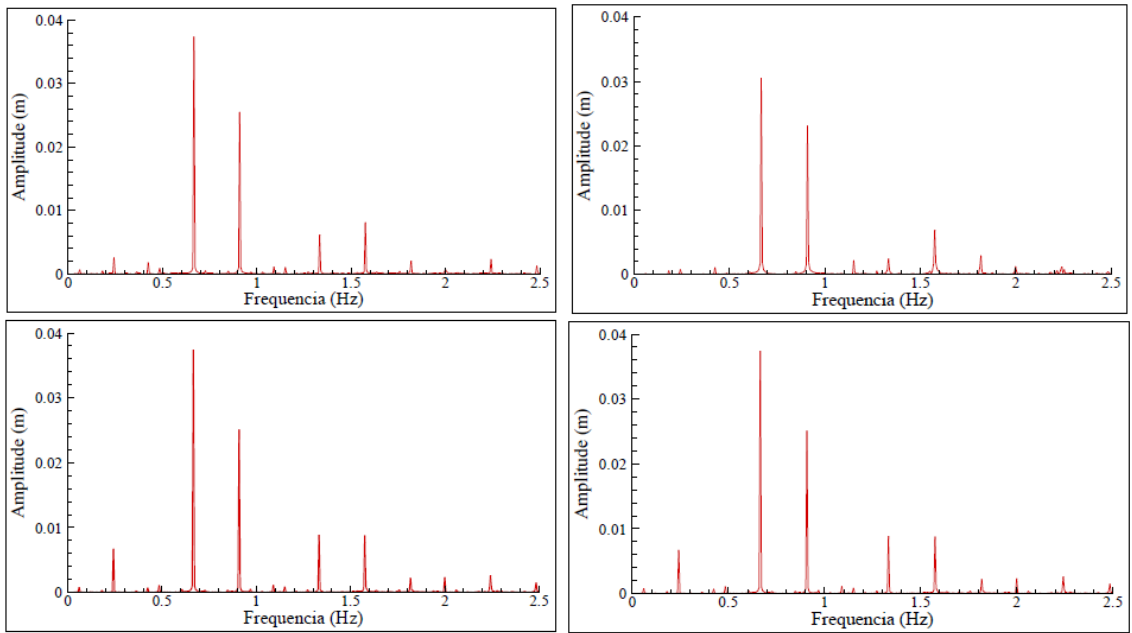
Para o caso experimental, verifica-se que ao longo da propagação ocorre o aparecimento das harmónicas devido à transformação da onda com a variação da profundidade, sendo que as harmónicas que aparecem são múltiplas e combinações das frequências fundamentais,  $f_1=1/T_1$ , correspondente a  $0.909\text{Hz}$ , e  $f_2=1/T_2$ , correspondente a  $0.667\text{Hz}$ .

Para o caso numérico, as frequências fundamentais aparecem com amplitudes mais baixas que o caso experimental, isto poderá dever-se ao facto de a onda bicromática perder as características lineares com a transformação que sofre devido à redução da profundidade e à redução da área da secção transversal do canal. Já o aparecimento das harmónicas não é tão nítido como no caso experimental.

Em ambos os casos, a frequência do envelope,  $f_{env}=f_2-f_1$ , torna-se mais importante à medida que a onda se propaga ao longo do canal.



**Figura 6.29** - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T_1=1.5s$ ,  $T_2=1.1s$  e  $H=0.05m$  para o caso numérico.



**Figura 6.30** - Espectro de amplitude para diferentes posições do canal para ondas incidentes de  $T_1=1.5s$ ,  $T_2=1.1s$  e  $H=0.05m$  para o caso experimental.



# 7º Capítulo

## Conclusões

A realização desta dissertação focou-se no estudo e validação do código numérico do *OpenFoam* para a simulação de diferentes teorias de ondas. Sendo o *OpenFoam* uma ferramenta livre e gratuita, é de grande interesse para a área da hidrodinâmica validar esta ferramenta do CFD para a simulação de problemas complexos de propagação de ondas.

Os resultados obtidos através das simulações realizadas foram satisfatórios, principalmente para os casos de propagação de ondas sem a ocorrência de rebentação.

O primeiro caso desta dissertação, de propagação de ondas num canal bidimensional com fundo horizontal, apenas serviu para verificar o bom funcionamento do *OpenFoam*, sendo que os resultados obtidos corresponderam bem com os resultados de Moreira [2].

Para os casos bidimensionais de propagação de ondas regulares com e sem rebentação num canal de fundo variável, os resultados obtidos foram os esperados teoricamente, uma vez que a propagação da onda ao longo do canal se deu sem o aumento da altura de onda verificado nos casos experimentais devido à redução da secção transversal do canal, sendo apenas sentido o efeito da variação da profundidade. No caso com rebentação, a partir do momento em que esta ocorre, os resultados divergem um pouco do caso experimental devido à não utilização de modelos de turbulência.

Nesta dissertação também se testou o código numérico do *OpenFoam* para os casos tridimensionais de ondas regulares de primeira ordem e ondas bicromáticas, com e sem rebentação. Para os casos sem rebentação, tanto de ondas regulares como bicromáticas, os resultados obtidos foram próximos dos resultados experimentais, notando-se no entanto uma diferença nas alturas de onda. Essa diferença de altura de onda entre os casos numéricos e experimentais pode dever-se a diferentes factores, como um mau refinamento da malha na direcção  $z$  ou pelo facto de que a onda gerada experimentalmente possuir diferenças lineares da onda gerada numericamente. Já nos casos com rebentação, de ondas regulares e bicromáticas, além da situação da diferença entre as alturas de ondas nos casos numéricos e experimentais, verifica-se uma

divergência de resultados no caso numérico a partir do momento em que a onda rebenta, mais uma vez devido à não utilização dos modelos de turbulência. No caso de ondas bicromáticas verificou-se ainda uma boa correspondência em relação ao período de envelope. A diferença entre a onda monocromática gerada numericamente e a onda gerada em laboratório é também notória na análise das velocidades, uma vez que nos casos numéricos a onda possui, no plano xz, orbitas circulares inicialmente, passando a orbitas elípticas à medida que a onda se propaga ao longo do canal, devido ao efeito da redução da profundidade. No caso experimental a onda começa a propagação já com as orbitas elípticas sendo que estas vão se alterando também com a propagação da onda, o que mostra que a onda criada pelo gerador no laboratório possui diferenças lineares da onda gerada numericamente.

Notou-se também algumas diferenças nos espectros de amplitudes entre os casos experimentais e numéricos, esta diferença poderá estar relacionada ao facto de a taxa de aquisição de dados no caso numérico ser mais baixa do que no caso experimental.

Numa perspectiva de trabalho futuro, seria interessante dar continuidade ao trabalho efectuado nesta dissertação, procurando melhorar os resultados dos casos tridimensionais através de um melhor refinamento das malhas. Também seria de interesse para a validação do código numérico a utilização dos modelos de turbulência para as situações com rebentação, de forma a aproximar os resultados com os obtidos em laboratório.

Seria ainda interessante repetir algumas simulações para diferentes alturas de ondas e períodos de forma a observar se o comportamento da propagação da onda corresponde aos resultados aqui apresentados.

# *Referências Bibliográficas*

- [1] OpenCFD Ltd. , The OpenFOAM Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/docs/user/fvSchemes.php>. [Acedido em 2014].
- [2] T. Moreira, “Contribuição para a validação do código numérico do OpenFOAM em escoamentos com superfície livre,” Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [3] J.M.P. Conde, R. Reis, C.J.E.M. Fortes e D. Neves, “Wave propagation on a Flume: Physical Modelling,” *Thermal Engineering*, Vol.11, 2012.
- [4] L.A.M. Endres, C.J.E.M. Fortes, T. Okamoto e D.R.C.B. Neves, “Directional spreading model in a wave channel: Wave propagation and wave breaking,” *Ocean Engineering* 55 148-160, 2012.
- [5] C.J.E.M. Fortes, R. Reis, E. Didier, R. Lemos e J.M.P. Conde, “Ensaios experimentais de ondas bicromáticas com e sem rebentação,” em *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, Bilbao, Espanha, 2013.
- [6] Associação Portuguesa dos Recursos Hidricos, “Gestão Costeira Integrada,” Available: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/ondasmarinhas.html>. [Acedido em 2014]
- [7] Z. Demirbilek e C. Vicent, “Chapter II-1, Engineer Manual, "Water Waves Mechanics",” em *Coastal Engineer Manual*, Washington, D.C., U.S. Army Corps of Engineers., 2002.
- [8] Thai Marine Meteorology, “Motion in the Sea - Waves,” Available: [http://www.marine.tmd.go.th/marinemet\\_html/lect18.html](http://www.marine.tmd.go.th/marinemet_html/lect18.html). [Acedido em 2014].
- [9] H. Versteeg e M. W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method", Longman Scientific & Technical , 1995.
- [10] OpenCFD Ltd., "Breaking of a Dam", The OpenFoam Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/docs/user/damBreak.php>. [Acedido em 2014].
- [11] OpenCFD Ltd., “Chapter 1 Introduction,” The OpenFoam Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/docs/user/userch1.php#x3-20001>. [Acedido em 2014].

- [12] OpenCFD Ltd., “The OpenFOAM Foundation,” The OpenFOAM Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/docs/user/models.php#x36-2040007>. [Acedido em 2014].
- [13] N. Jacobsen, D. Fuhrman e J. Fresoe, “A wave generation toolbox for the open-source CFD library: OpenFoam,” *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 70:1073-1088, 2011.
- [14] OpenCFD Ltd., “User guide - 4.5 Solution and algorithm control,” The OpenFOAM Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/docs/user/fvSolution.php#x21-1260004.5.4>. [Acedido em 2014].
- [15] OpenCFD Ltd., “User guide - 4.4 Numerical schemes,” The OpenFoam Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/docs/user/fvSchemes.php#x20-1070004.4>. [Acedido em 2014].
- [16] J.M.P. Conde, C.J.E.M. Fortes, R. Lemos e R. Reis, “Ensaio Experimentais de Ondas Irregulares com Rebentação,” em *8ªS Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, LNEC, 2013.
- [17] J.M.P. Conde, C.J.E.M. Fortes, E. Didier, R. Lemos e R. Reis “Physical modelling of bichromatic wave propagation and wave breaking in a wave flume,” em *6th SCACR - International short course/Conference on applied coastal research.*, LNEC, 2013.
- [18] OpenCFD Ltd., “The OpenFOAM Foundation,” The OpenFOAM Foundation, Available: [www.openfoam.org](http://www.openfoam.org). [Acedido em 2014].
- [19] OpenCFD Ltd., “OpenFOAM Foundation Releases OpenFOAM 2.2.1,” The OpenFOAM Foundation, Available: <http://www.openfoam.org/version2.2.1/>. [Acedido em 2014].
- [20] “Contrib/waves2Foam,” OpenFOAMWiki, Available: <http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/waves2Foam>. [Acedido em 2014].
- [21] OpenCFD Ltd., “User Guide - 7.1 Thermophysical models,” The OpenFOAM Foudantion, Available: <http://www.openfoam.org/docs/user/thermophysical.php#x37-2050007.1>. [Acedido em 2014].